

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

(повна назва інституту/факультету)

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

В.о.завідувача кафедри

_____ **Анатолій ОРЛОВ**
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2020 р.

**Дипломна робота
на здобуття ступеня бакалавра
за спеціальністю 153 Мікро-та наносистемна техніка
(код і назва)**

на тему: Послідовне включення тунельних діодів

Виконав (-ла): студент (-ка) 4 курсу, групи

ДП-61
(шифр групи)

Рудаков Дмитро Юрійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

Керівник професор, кандидат технічних наук, Борисов О.В.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Консультант з нормоконтролю

доц., к.ф.-м.н., с.н.с.

Георгій СВЄЧНИКОВ

Консультант з інформаційних питань доц., к.т.н., Юрій ДІДЕНКО

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.

Студент _____

(підпис)

Київ – 2020 року

Завдання на дипломну роботу

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут/факультет _____
(повна назва)

Кафедра _____
(повна назва)

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність (спеціалізація) _____
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.о.завідувача кафедри
_____ Анатолій ОРЛОВ
(підпис) (ініціали, прізвище)
«___» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ на дипломний проект (роботу) студенту

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) _____

керівник проекту (роботи) _____,
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «___» _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

4. Зміст (дипломної роботи) пояснювальної записки (перелік завдань, які потрібно розробити) _____

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо) _____

6. Консультанти розділів проекту (роботи)*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Підпис керівника

Студент

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

Керівник проекту (роботи)

_____ (підпис)

_____ (ініціали, прізвище)

* Консультантом не може бути зазначено керівника дипломного проекту (роботи)

РЕФЕРАТ

Структура і обсяг роботи:

За мету даної роботи було поставлено дослідження вольт-амперних характеристик (ВАХ) послідовного включення тунельних діодів (послідовне зустрічне та послідовне співнапрявлене включення).

Об'єктом дослідження є послідовне включення тунельних діодів. Предметом дослідження є вольт-амперні характеристики таких з'єднань. Методи які було використано під час написання роботи: вимірювання ВАХ напівпровідникових приладів, зокрема самих тунельних діодів, комп'ютерна обробка даних отриманих при проведенні експерименту.

В найближчому майбутньому в галузі вивчення фізики тунельного ефекту в напівпровідниках і створенні приладів, які використовують тунельний ефект на мою думку слід очікувати ще багато нових відкриттів і винаходів. Оскільки тунельний діод можна застосовувати у великій кількості приладів таких як підсилювачі (ВЧ, НВЧ, надрегенеративні), генератори гармонічних коливань (генератори підвищеної потужності, генератори НВЧ), детектори (регенеративний детектор, надрегенеративний детектор), перетворювачі частоти.

Саме тому в роботі наведений кількісний та якісний опис роботи послідовного з'єднання тунельних діодів, що дасть змогу зрозуміти особливість такого з'єднання.

Ключові слова: напівпровідниковий прилад, тунельний діод, вольт-амперна характеристика, тунельний ефект.

ABSTRACT

Structure and scope of work:

The purpose of this work was to study the volt-ampere characteristics ($I - V$) of series connection of tunnel diodes (series counter and series co-directional connection).

The object of the study is the series connection of tunnel diodes. The subject of the study is the volt-ampere characteristics of such connections. Methods used during the writing of the work: measurement of the $I - V$ characteristics of semiconductor devices, in particular the tunnel diodes themselves, computer processing of data obtained during the experiment.

In the near future, in the field of studying the physics of the tunnel effect in semiconductors and the creation of devices that use the tunneling effect, in my opinion, we should expect many more new discoveries and inventions. Because the tunnel diode can be used in a large number of devices such as amplifiers (HF, microwave, superregenerative), harmonic oscillators (high power generators, microwave generators), detectors (regenerative detector, superregenerative detector), frequency converters.

That is why the paper provides a quantitative and qualitative description of the series connection of tunnel diodes, which will allow us to understand the peculiarities of such a connection.

Key words: semiconductor device, tunnel diode, volt-ampere characteristic, tunnel effect.

ЗМІСТ

Завдання на дипломну роботу	2
ВСТУП	7
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	8
1. ФІЗИКА ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТУНЕЛЬНОГО ДІОДА	9
1.1 Тунельний ефект.....	9
1.2 Тунельний діод та принцип його дії.....	13
1.3 Параметри тунельного діода	19
1.4 Технологія виготовлення тунельного діода.....	24
1.5 Застосування тунельного діода	26
2. ПОСЛІДОВНЕ ЗУСТРІЧНЕ ВКЛЮЧЕННЯ ТУНЕЛЬНИХ ДІОДІВ.....	32
3. ПОСЛІДОВНЕ СПІВНАПРЯМЛЕНЕ З'ЄДНАННЯ ТУНЕЛЬНИХ ДІОДІВ	40
3.1 Перший випадок співнапрявленого з'єднання тунельних діодів	40
3.2 Другий випадок співнапрявленого з'єднання тунельних діодів.....	47
ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ, ПОСИЛАННЯ	60

ВСТУП

Тунельні діоди - це один із найзначніших твердотільних електронних пристроїв, що з'явилися. Тунельний діод був винайдений у 1958 році Левом Есакі.

Лев Есакі зауважив, що якщо напівпровідниковий діод сильно легований домішками, він покаже негативний диференціальний опір. Негативний диференціальний опір означає, що струм через тунельний діод зменшується при збільшенні напруги. У 1973 році Лео Есакі отримав Нобелівську премію з фізики за виявлення ефекту тунелювання електронів, який використовується в цих діодах.

Тунельний діод також відомий як діод Есакі, який названий на честь Льва Есакі за його роботу над тунельним ефектом.

Тунельні діоди відрізняються своєю довговічністю, при цьому пристрої, виготовлені в 1960-х роках, ще функціонують. Пишучи в Nature, Есакі та співавтори заявляють, що напівпровідникові пристрої взагалі надзвичайно стійкі, і припускають, що термін їх зберігання повинен бути "нескінченним", якщо зберігати при кімнатній температурі. Вони продовжують повідомляти, що невеликий масштабний тест 50-річних пристроїв виявив "втішне підтвердження довговічності діода".

Саме через незвичну вольт-амперну характеристику та довговічність тунельних діодів, я вирішив працювати над такою темою дипломної роботи. Мені здається такий пристрій є дуже перспективним в подальшому розвитку наших технологій.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

U_0 – висота потенційного бар'єру;

E – енергія частинки;

ψ – хвильова функція;

N – число падаючих на сходинку частинок;

D – коефіцієнт проходження бар'єру;

D_0 – коефіцієнт проникності;

k – хвильовий вектор;

I_p – струм піку;

I_v – мінімальне значення струму;

U_p – пікове значення напруги;

U_v – мінімальне значення напруги;

$r_{\text{диф}}$ – диференціальний опір;

L_v – індуктивність виводів;

z – повний опір тунельного діода;

g – негативна диференціальна провідність тунельного діода;

ω_R – гранична резистивна частота;

U_g – напруга генератора;

U_n – напруга навантаження;

$K_{\text{вн}}$ – коефіцієнт внесеного підсилення;

ВЧ – високочастотний;

НВЧ – надвисокочастотний;

ВАХ – вольт-амперна характеристика

МВЕ – молекулярно-променева епітаксія;

MOCVD – осадження металоорганічних хімічних парів;

1. ФІЗИКА ТА ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТЕНУЛЬНОГО ДІОДА

1.1 Тунельний ефект

Тунельний ефект – це фізичне явище, при якому фізичний об'єкт (частинка) долає потенційний бар'єр, значення енергії якого більша від кінетичної енергії об'єкта (частинки).

Такий ефект можна пояснити розглядаючи поведінку частинки, яка проходить через потенціальний бар'єр. Якщо частинка, яка рухається зліва на право на зустріч потенціальному бар'єру висотою U і шириною x , то по класичним міркуванням рух частинки буде таким:

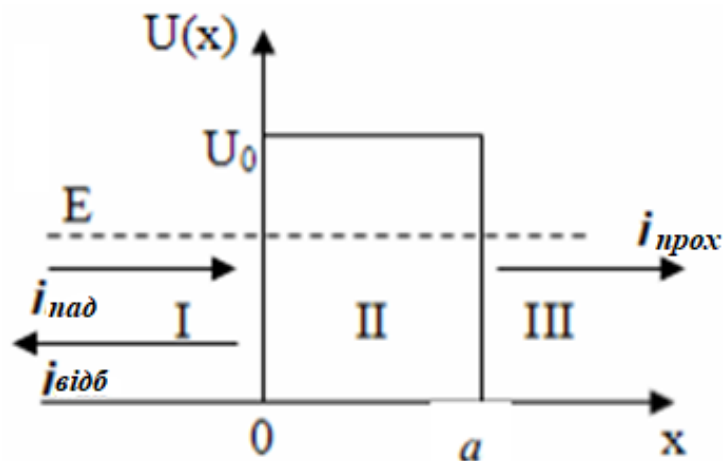


Рис. 1.1.1 . Проходження частинки через потенціальний бар'єр [6]

- Якщо енергія частинки буде більшою висоти бар'єру ($E < U_0$), то частинка пройде над бар'єром;
- Якщо енергія частинки буде меншою висоти бар'єру ($E > U_0$), то частинка відіб'ється від бар'єру і полетить в іншу сторону;
- Крізь бар'єр частинка проникнути не може.

По законам квантової механіки частинка частинка буде мати інакшу поведінку.

При $E > U_0$ маємо відмінну від нуля ймовірність, що частинка відіб'ється від потенціального бар'єру і полетить назад. При $E < U_0$ є ймовірність того, що частинка проникне «крізь» бар'єр і опиниться в області III. Таку поведінку частинки описують рівнянням Шредінгера:

$$\nabla^2 \psi + \frac{2m}{\hbar^2} (E - U) \psi = 0, \quad (1.1.1)$$

Ψ - хвильова функція мікрочастинки. Для областей I та III рівняння Шредінгера буде однаковим, через це розглянемо лише області I та II. Рівняння Шредінгера для I області буде мати вигляд:

$$\nabla^2 \psi_1 + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi_1 = 0, \quad (1.1.2)$$

Введемо позначення:

$$k_1 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2mE}, \quad (1.1.3)$$

Підставивши отримаємо:

$$\nabla^2 \psi_1 + k_1^2 \psi_1 = 0, \quad (1.1.4)$$

Аналогічно для II області:

$$\text{де } k_2 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(E - U)}$$

$$\nabla^2 \psi_2 + k_2^2 \psi_2 = 0, \quad (1.1.5)$$

Рівняння, які ми отримали, називаються характеристичними, загальним видом яких є:

$$\psi_1 = A_1 e^{ik_1 x} + B_1 e^{-ik_1 x} \text{ при } x < 0, \quad (1.1.6)$$

$$\psi_2 = A_2 e^{ik_2 x} + B_2 e^{-ik_2 x} \text{ при } x > 0, \quad (1.1.7)$$

$A_1 e^{ik_1 x}$ відповідає хвилі, яка розповсюджується в області I в напрямку осі x , A_1 – амплітуда хвилі. $B_1 e^{-ik_1 x}$ – відповідає хвилі, яка розповсюджується в області I в напрямку, протилежному x , тобто це відбита хвиля від бар'єру. B_1 – амплітуда цієї хвилі.

Коефіцієнт відбиття частинок – це відношення потоку відбитих частинок $j_{\text{відб.}} = N \frac{k\hbar}{m} |\psi_{\text{відб.}}|^2$ до потоку падаючих частинок $j_{\text{пад.}} = N \frac{k\hbar}{m} |\psi_{\text{пад.}}|^2$, де N – число падаючих на сходинку частинок.

Коефіцієнт відбиття:

$$R = \frac{j_{\text{відб.}}}{j_{\text{пад.}}} = \frac{|\psi_{\text{відб.}}|^2}{|\psi_{\text{пад.}}|^2} = \frac{|B_1|^2}{|A_1|^2}, \quad (1.1.8)$$

$A_2 e^{ik_2 x}$ відповідає хвилі, розповсюджується в області II в напрямку x . $B_2 e^{-ik_2 x}$ повинно відповідати відбитій хвилі, які розповсюджуються в області II. Так як такої хвилі не має, то B_2 потрібно покласти рівними нулю.

Відношення $D = \frac{j_{\text{прох.}}}{j_{\text{пад.}}}$ представляє собою коефіцієнт проходження бар'єру.

Для прямокутного потенціального бар'єру, зображено на рис.1 маємо:

$$D = \frac{j_{\text{прох.}}}{j_{\text{пад.}}} = \frac{|\psi_{\text{прох.}}|^2}{|\psi_{\text{пад.}}|^2} = \frac{|A_2|^2}{|A_1|^2} \quad (1.1.9)$$

Для бар'єр висота якого $U > E$, хвильовий вектор k_2 є уявним. Взявши його рівним ik , де $k_1 = \frac{1}{\hbar} \sqrt{2m(U - E)}$ є дійсним числом. Тоді хвильові функції ψ_1 та ψ_2 отримують наступний вигляд:

$$\psi_1 = A_1 e^{ik_1 x} + B_1 e^{-ik_1 x}, \quad (1.1.10)$$

$$\psi_2 = A_2 e^{-kx}. \quad (1.1.11)$$

Так як $A_2 \neq 0$, то ймовірність проникнення мікрочастинки на деяку глибину в II область. Ця ймовірність пропорційна квадрату модуля хвильової функції ψ_2 :

$$\omega \sim |\psi_2|^2 \sim A^2 e^{-\frac{2x}{\hbar} \sqrt{2m(U-E)}}. \quad (1.1.12)$$

Ця ймовірність робить можливим проходження мікрочастинок крізь бар'єр кінцевої товщини a (Рис.1.1.1). Таке проходження отримало назву тунельного ефекту.

По формулі $\psi_2 = A_2 e^{-kx}$ коефіцієнт проходження такого бар'єру буде дорівнювати:

$$D = D_0 e^{-\frac{2a}{\hbar} \sqrt{2m(U-E)}}, \quad (1.1.13)$$

де D_0 – коефіцієнт проникності, який залежить від форми бар'єру. Головною особливістю тунельного ефекту є те, що при проходження крізь потенціальний бар'єр енергії мікрочастинок змінюються. Тобто вони виходять з бар'єру з тією ж енергією, з якою в неї входять. Якщо потенціальний бар'єр має довільну форму, то його розбивають на n вузьких

прямокутних потенціальних бар'єрів шириною ∇x і висотою $U(x)$. Потік частинок через вузький потенціальний бар'єр буде потоком частинок, які падають на наступний потенціальний бар'єр.

Коефіцієнт проходження через всі бар'єри є добутком коефіцієнтів проходження через кожен з бар'єрів (ймовірності перемножуються), експоненти в множниках додаються і при $\Delta x \rightarrow dx$ отримуємо інтеграл:

$$D = \frac{j_{\text{прох.}}}{j_{\text{пад.}}} = D_n \cdot D_{n-1} \cdot \dots \cdot D_2 \cdot D_1 \quad (1.1.14)$$

$$= \text{const} \cdot \exp \left(-\frac{2}{\hbar} \cdot \int_{x_1}^{x_2} \sqrt{2m(U(x) - E)} dx \right)$$

Електронна емісія під дією сильного поля, проходження струму через діелектричні плівки, пробій р-n переходу всі ці явища можливі завдяки тунельного ефекту. На його основі створені тунельні діоди, робота яких досліджується в даній роботі.

1.2 Тунельний діод та принцип його дії

Тунельний діод – напівпровідниковий активний елемент електричного кола з сильно легованим р + -n +-перехід з малою товщиною замикаючого шару, нелінійною вольт-амперною характеристикою з від'ємною диференційною провідністю.

Тунельний діод є аналогічним звичайному напівпровідниковому діоду, але відрізняється величезною концентрацією домішок в n та р областях та вузьким р-n переходом. Робочим елементом якого є сильно легований р-n перехід. Ця структура складається з двох областей напівпровідника: р - область з дірковою провідністю та n – області з електронною провідністю. Ge,

Si, GaAs, InSb – це матеріали які використовуються для виготовлення тунельних діодів.

На рис.1.2.1 зображено статичну вольт-амперну характеристику тунельного діода. ВАХ тунельного діода по своєму виду відноситься до характеристик, стабільних по напрузі, тобто положення робочої точки на ній однозначно визначається заданою напругою та неоднозначно – струмом. На відміну від звичайного діода струм тунельного діода при невеликих напругах в прямому і оберненому напрямі сильно росте. Це пояснюється наявністю тунельного ефекту переходу носіїв заряду з однієї р-n області тунельного діода в іншу.

Якщо подати напругу від'ємної полярності (від'ємний потенціал до р-області) струм монотонно буде зростати. Тут можна відзначити, що тунельний діод не володіє випрямляючими властивостями.

При подачі прямого зміщення струм спочатку росте до максимального значення струму піку I_p при напрузі піку U_p , а далі зменшується до мінімального значення струму впадини I_v при напрузі впадини U_v . Це відбувається тому, що при збільшенні прямої напруги зменшується число електронів, здатних тунелювати. При U_v число електронів стає таким низьким, що тунельний ефект майже зникає. Залишається лише струм електронів, які проходять внаслідок механізму, існуючому в звичайних діодах.

Якщо переходити напругу U_v , струм починає експоненціально зростати. Статична характеристика складається, в основному, з тунельного струму носіїв між зонами і надбар'єрного дифузійного струму (рис. 1.2.1).

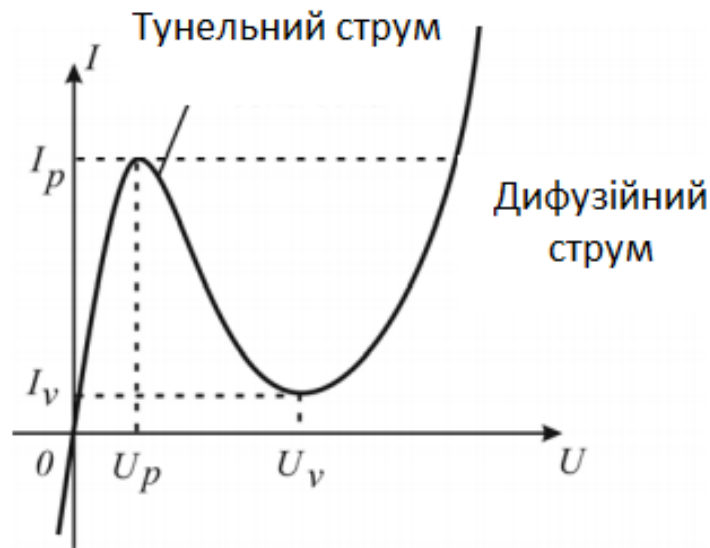


Рис.1.2.1. Вольт-амперна характеристика тунельного діода: I_p і U_p - піковий струм і напруга; I_v і U_v – струм і напруга в мінімумі [1]

При тунельному механізмі електрон не витрачає енергію на перехід потенціального бар'єру. Саме в р-n переході такий ефект є можливим тільки якщо р- та n- області мають дуже малий питомий опір. Через це при виготовленні тунельного діода використовують напівпровідникові матеріали з високою електропровідністю.

При якісному розгляді тунелювання на спрощеній зонній структурі, можна відзначити, що через сильну легованість р-n переходу електронно-дірковий газ в структурі вироджений, тобто рівні Фермі р- та n- областей знаходяться в середині дозволених зон. Якщо вважати, що і з того, і з іншого боку р-n переходу вище рівня Фермі відсутні заповнені стани, а нижче рівня Фермі відсутні вільні стани (таке можливо тільки при нульовій температурі, але для спрощеного вигляду якісно це нічого не змінить), то у відсутність зовнішньої напруги область, яка містить вільні електрони і область, що має вільні рівні, не перекриваються по енергіях, тобто тунельний струм в такій ситуації протікати не може. Такому стану ВАХ відповідає точка 0 на рис.1.2.2 б).

При подаванні зовнішньої напруги у зворотному напрямі висота потенціального бар'єра р-п переходу збільшується і саме тому у сусідніх областях збільшується перекривання енергетичних зон. Вільні рівні в зоні провідності п-області розміщуються навпроти зайнятих рівнів валентної зони р-області, а також зайняті рівні зони провідності п-області — навпроти абсолютно зайнятих рівнів валентної зони р області рис. 1.2.2. а). Імовірність переходу електронів з валентної зони р-області збільшується, а зворотного переходу зменшується. Порушується рівновага і через діод буде проходити тунельний струм у зворотному напрямі (дивитись ВАХ рис. 1.2.2. а). У міру підвищення зворотної напруги буде різко збільшуватися значення цього струму, оскільки при цьому ще більша кількість електронів з валентної зони р-області має можливість тунелювати в зону провідності п-області. Носії долають потенціальний бар'єр.

Для процесу тунелювання необхідні такі умови:

- 1) наявність заповнених станів з боку переходу, звідки електрон тунелює;
- 2) наявність з іншого боку переходу вільних рівнів тієї ж енергії;
- 3) висота і ширина потенціального бар'єру повинні бути досить малими, щоб існувала кінцева ймовірність тунелювання електрону крізь бар'єр;
- 4) в процесі тунелювання повинен зберігатися квазіімпульс.

На рис.1.2.2 показано тунелювання електрона з валентної зони в зону провідності при зворотному зміщенні. Відповідні величини струму та напруги відзначені точками на вольт-амперних характеристиках.

При подачі невеликого прямого зміщення є область значень енергії, для якої існують заповнені стани з п-сторони і тому вільні стани з р-сторони. Коли ці області максимально перекриваються по енергіях, то в структурі протікає максимальний струм (рис.1.2.2. в).

При наступному збільшенні прямого зміщення кількість вільних рівнів з р-сторони, що мають ту ж енергію, зменшується (рис.1.2.2 г). В забороненій зоні станів для електронів немає, тобто перехід туди неможливий. Якщо

докладена пряма напруга такої величини, що зони «не перекриваються», тобто дно зони провідності і вершина валентної зони розташовані на одному рівні, то в цьому випадку навпаки заповнених станів n -області лежать заборонені стани з області (наявності станів в забороненій зоні ми нехтуємо, задля спрощення). У цій точці тунелювання носіїв припиняється. Але повний струм при цьому нулю не досягається оскільки присутня ще і класична компонента, обумовлена надбар'єрними переходами електронів і дірок. У точці мінімуму цей струм малий тому, що потенціальний бар'єр для носіїв ще досить високий.

При подальшому збільшенні прикладеної напруги інжекційний струм буде експоненціально зростати (рис.1.2.2 д).

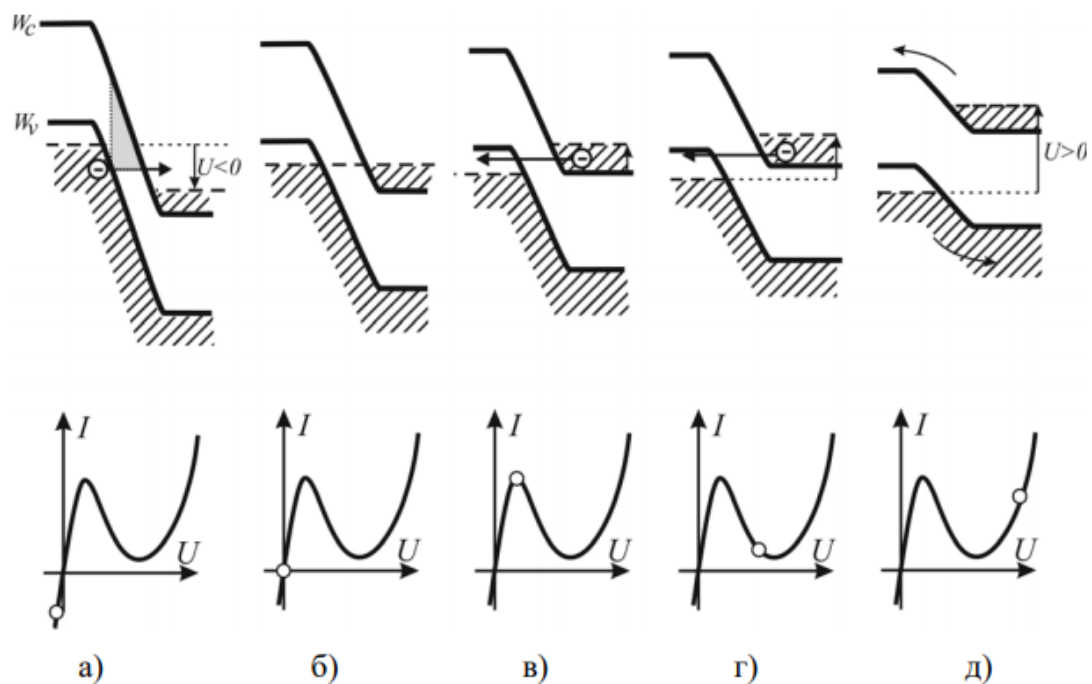


Рис. 1.2.2. Спрощена зонна структура тунельного діода: а) – зворотне зміщення; б) термодинамічна рівновага; в) пряме зміщення, при якому виникає піковий струм; г) пряме зміщення, при якому починається «струм долини»; д) пряме зміщення, при якому тече дифузний струм [2]. Сірим кольором виділений трикутник потенціального бар'єру, подоланого електроном при тунелюванні. [7]

Також варто зазначити, що процес тунелювання може бути прямим та непрямым.

У випадку прямого тунелювання на графіку (Рис.1.2.3) залежності енергії від хвильового числа $W(k)$ співставленого з картиною тунельного переходу в W - x координатах видно, що електрон може тунелювати з околу мінімуму функції в точку з аналогічним значенням квазіімпульсу в околі функції $W(k)$ валентної зони. Сама функція описує залежність енергії від хвильового вектора для зони провідності. Пряме тунелювання буде існувати при умові, що мінімум зони провідності та максимум зони валентності матимуть однакове значення квазіімпульсу.

Якщо ж абсолютний мінімум зони провідності та максимум зони валентності лежать в різних точках, відбуватиметься непряме тунелювання. Розсіюючим агентам, наприклад фононам, передається різниця імпульсів. Закони збереження енергії і імпульсу при тунелюванні за участю фононів: $W_0 + w_{\text{фон}} = W_1$, $p_0 + \hbar k = p_1$, де W_0 - первісна енергії електрона, тунелюють з p -області в p -область, $w_{\text{фон}}$ - енергія фонона, W_1 - кінцева енергія електрона після тунелювання, p_0 - початкове значення імпульсу електрона, $\hbar k$ - імпульс фонона, p_1 - імпульс електрона після тунелювання. Ймовірність тунелювання при використанні одного фонона набагато більша, ніж ймовірність багато фононного непрямого тунелювання. Також варто відзначити, що ймовірність непрямого тунелювання набагато менша, ніж ймовірність прямого.

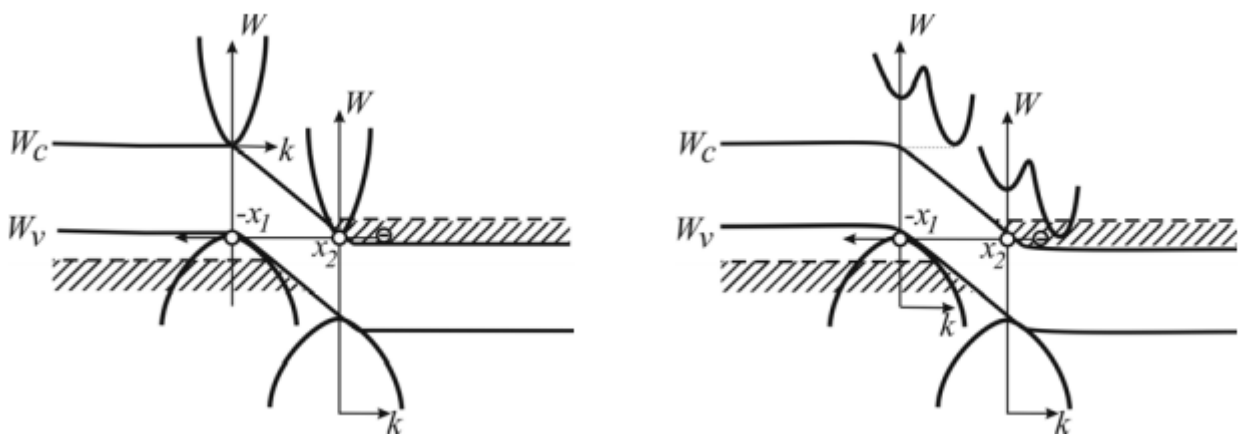


Рис.1.2.3. Тунелювання: а) випадок прямого тунелювання; б) випадок

непрямого тунелювання, коли $k_{\min} \neq k_{\max}$. Залежність $W(k)$ накладена в характерних точках ($-x_1$ і x_2) на картину тунельного переходу в $W - x$ координатах.

1.3 Параметри тунельного діода

Параметри такого напівпровідникового діода визначаються координатами екстремальних точок на вольт-амперній характеристиці.

I_p – піковий струм, прямий струм (від долей мА до сотень мА) у точці максимуму вольт-амперної характеристики,

I_v – прямий струм у точці мінімуму вольт-амперної характеристики,

Для різних матеріалів відношення I_p / I_v варіюється від декількох одиниць (германієві діоди) до 10 і більше (арсенід галієві діоди).

U_p – напруга піку, його величина від кількох десятків мілівольт до ста і більше мілівольт для діодів з різних матеріалів,

U_v – напруга мінімуму, величина якої кілька сотень мілівольт в залежності від матеріалу,

$r_{\text{диф}}$ – диференціальний опір, який видно на падаючій ділянці вольт-амперної характеристики. Його модуль в залежності від матеріалу діоду має величину від одиниць Ом до кількох сотень Ом.

$f_{\text{рез}}$ – гранична резистивна частота, тобто частота до якої виявляється негативний диференціальний опір на виводах тунельного діода (зовнішніх) .

Температурні залежності параметрів тунельного діода

На тунельну складову струму та складову, що пов'язана з інжекцією тунельного діода зміна температури впливає по різному.

На тунельну складову струму впливають такі чинники:

- Ширина забороненої зони, тунельних діодів з арсеніду галію і германію, зменшується з підвищенням температури. Це призводить до збільшення ймовірності тунелювання електронів через зменшення товщини потенціального бар'єру. Саме тому тунельна складова струму при збільшенні температури, починає зростати і піковий струм також.

- При збільшенні температури розподіл електронів змінюється за енергетичними рівнями – частина вільних електронів з під рівня Фермі переходить на більш високі енергетичні рівні, а сам рівень Фермі зміщується вниз. Кількість електронів, які можуть тунелювати з n-області в р-область зменшується. Тунельна складова прямого струму зменшується.

Ці факти є протилежними один одному, тому їх сумарний вплив буде малим, а також може призвести як до збільшення, так і до зменшення I_p тунельного діода зі збільшенням температури.

Зі збільшенням температури інжекційна складова струму зростає, оскільки зменшується висота потенціального бар'єру і присутній перерозподіл носіїв заряду за енергетичними рівнями. Через це струм мінімуму тунельного діода зростає зі збільшенням температури.

Частотні характеристики тунельних діодів

Тунельні діоди можуть працювати на частотах до сотень гігагерц, що в межах міліметрового діапазону радіохвиль. Такий діапазон пояснюється тим, що ефект накопичення у базі неосновних носіїв практично відсутній, оскільки використовуються малі напруги, відповідні ділянці вольт-амперної характеристики з негативним диференціальним опором. Верхня робоча межа частотного діапазону тунельного діоду обмежується лише паразитними реактивностями, тобто власною ємністю, основна частина якої – бар'єрна ємність p-n переходу, та індуктивність виводів та корпусу.

Щоб проаналізувати параметри характеризуючі частотні властивості тунельних діодів, користуються еквівалентною схемою тунельного діода малого змінного сигналу з постійною напругою, якою зміщується робоча точка на ділянку вольт-амперної характеристики з диференціальним опором. Єдина відмінність від еквівалентної схеми звичайного діода – це введення замість активного опору переходу негативний диференціальний опір $r_{\text{диф}}$ і ще враховують індуктивність виводів L_B . (Рис. 4)

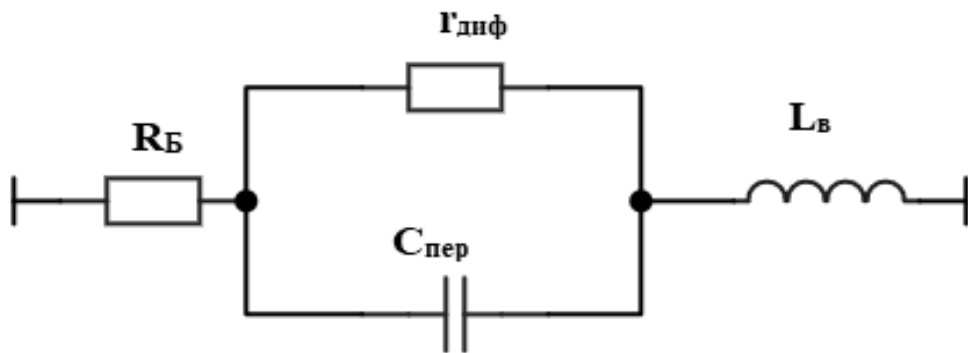


Рис. 1.3.1. Еквівалентна схема тунельного діода [8]

При малій синусоїдальній напрузі повний опір тунельного діода дорівнює:

$$z = r_B + j\omega L_B + \frac{1}{g + j\omega C_{\text{пер}}} \quad (1.3.1)$$

$$= r_B + \frac{g}{g^2 + \omega^2 C_{\text{пер}}^2} + j \left(\omega L_B - \frac{\omega C_{\text{пер}}}{g^2 + \omega^2 C_{\text{пер}}^2} \right)$$

$g = 1/r_{\text{диф}}$ – негативна диференціальна провідність тунельного діода.

У тунельному діоді негативний диференціальний опір існує, якщо дійсна частина повного опору менша нуля:

$$r_B < \left| \frac{g}{g^2 + \omega^2 C_{\text{пер}}^2} \right|, \quad (1.3.2)$$

Тунельний діод не має негативного диференціального опору при великих частотах, оскільки при великій частоті у дійсній частині другий доданок буде меншим першого доданка. Визначивши граничну резистивну частоту, при якій активна складова повного опору тунельного діоду стає нулем, отримаємо рівність:

$$r_B = \frac{g}{g^2 + \omega^2 C_{\text{пер}}^2}, \quad (1.3.3)$$

Звідси

$$\omega_R = \frac{1}{|r_{\text{диф}}| C_{\text{пер}}} \sqrt{\frac{|r_{\text{диф}}|}{r_B} - 1}, \quad (1.3.4)$$

З цього співвідношення бачимо, що гранична резистивна частота тунельного діода залежить від відношення бази діода й абсолютного значення негативного диференціального опору. Екстремальні значення граничної резистивної характеристики знаходять диференціюючи по $|r_{\text{диф}}|$ і прирівнюючи до нуля:

$$|r_{\text{диф}}| = 2r_B$$

При такій умові гранична резистивна частота буде максимальною. З параметрами еквівалентної схеми вона зв'язана виразом:

$$f_R = \frac{1}{2\pi |r_{\text{диф}}| C_{\text{пер}}}. \quad (1.3.5)$$

$$|r_{\text{диф}}| = \frac{\Delta U}{\Delta I} = \frac{U_v - U_p}{I_p - I_v} \approx \frac{\text{const}}{I_p} \Rightarrow f_R \approx \frac{I_p}{C_{\text{пер}}} \quad (1.3.6)$$

- усереднений негативний диференціальний опір.

Саме тому відношення ємності тунельного діода до пікового струму є одним з основних параметрів тунельного діода, який характеризує його частотні властивості.

У тунельному діоді при деякій частоті можуть виникати умови для резонансу, якщо він має паразитну індуктивність та ємність. Тому резонансну частоту виділяють як ще один параметр, що характеризує частотні властивості тунельного діода.

Визначають її з співвідношення:

$$\omega_0 L = \frac{\omega_0 C_{\text{пер}}}{g^2 + \omega^2 C_{\text{пер}}^2}, \quad (1.3.7)$$

тоді

$$\omega_0 = \frac{1}{|r_{\text{диф}}| C_{\text{пер}}} \sqrt{\frac{|r_{\text{диф}}|^2 C_{\text{пер}}}{L} - 1}. \quad (1.3.8)$$

Тунельні діоди конструюють так, щоб резонансна частота була вище граничної резистивної частоти ($\omega_0 > \omega_R$), тоді резонансні явища на будуть з'являтися на частотах де спостерігається негативний диференціальний опір. З урахуванням попередніх співвідношень перетворимо нерівність ($\omega_0 > \omega_R$) у:

$$L < r_{\text{Б}} |r_{\text{диф}}| C_{\text{пер}}. \quad (1.3.9)$$

Отже, індуктивність еквівалентної схеми тунельного діода повинна бути малою. Тому виводи тунельних діодів роблять у вигляді стрічок, мембран, тощо. Щоб зменшити ємність, роблять малу площу р-п-переходу, тому тунельні діоди, як правило, малопотужні.

1.4 Технологія виготовлення тунельного діода

Тунельні діоди виготовлялися різноманітними способами. Метод сплавлення – монокристал виродженого напівпровідника, наприклад германію, ріжуть на пластинки, потім після травлення і полірування їх ріжуть на кристали певної площі. На ці кристали поміщають таблетку акцепторного матеріалу, частіше всього GaAs, і поміщають все у вакуумну піч, в якій акцепторна таблетка і шар напівпровідника під нею розплавляються. Температуру починають понижувати і при цьому структура кристалізується утворюючи високолегований p-n перехід. Згодом до структури додають оммічні контакти та поміщають все у корпус. [9] Планарна технологія – виготовлення плоского тунельного діода, яке включає в себе вирощування структури, дифузійні процеси та контрольоване сплавлення.

Більш новітні методи засновані на низькотемпературному епітаксialьному нарощуванні напівпровідникових шарів з заданими концентраціями домішок. До них відносяться MBE (молекулярно-променева епітаксія) та MOCVD (осадження металоорганічних хімічних парів)[11]. Ці методи дають більш високе співвідношення пік-долина через більш високі та більш гострі домішкові профілі для більш високого пікового тунельного струму, а також менші щільності дефектів при меншому надлишковому струмі. В таких діодах компенсована область між p- і n-областями, в якій концентрації донорів і акцепторів однакові, дуже тонка - практично відсутня. Це є основний недолік сучасних тунельних діодів. Вирішення цієї проблеми описано в патенті України за 2009 рік. [10]

Для усунення такого недоліку в тунельному діоді між p- та n- областями запропоновано створити шар виродженого компенсованого напівпровідника (Рис.1.4.1), товщина якого на декілька порядків більша, ніж ширина p-n переходу в звичайному тунельному діоді.

Така модернізація реалізується через технологію виготовлення. Для реалізації такої структури проводять два епітаксіальних нарощування на установці для епітаксіального нарощування напівпровідника із рідинної фази. На підкладці n-типу нарощується вироджений компенсований шар c-типу при першому етапі. Для шару c-типу використовується розчин германію та індію. На другому етапі на компенсований шар c-типу нарощується р- шар з підвищеною концентрацією акцепторів. По суті в такому тунельному діоді формується структура р-с-п типу. На нижній та верхній поверхні підкладки формуються невідпрямляючі (омічні) контакти, а сама підкладка ділиться на окремі кристали. Кожен кристал (р-п структура) розміщується в корпусі, де до р- і n-областей підключаються електроди. Технічним результатом винаходу є: зменшення надлишкового струму, збільшення коефіцієнта якості, а також збільшення коефіцієнта затухання струму.

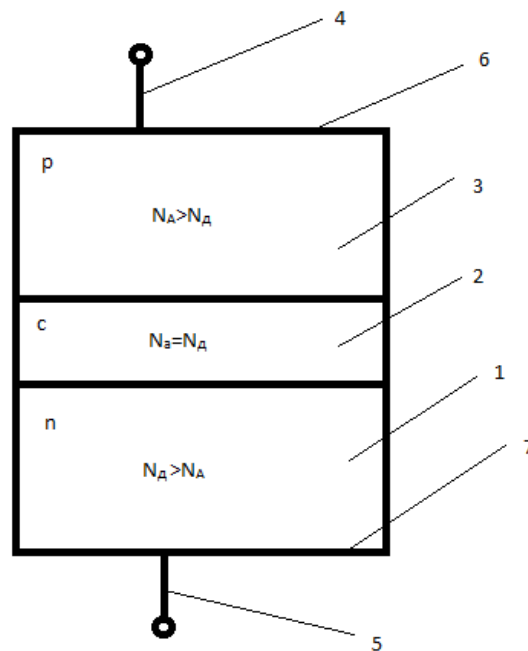


Рис.1.4.1. Конструкція тунельного діода з компенсованим шаром між р- та n- областями: 1 -підкладинка n-типу; 2 вироджений компенсований напівпровідник c-типу; 3-вироджена р-область; 4,5-електроди; 6,7-омічні контакти.

1.5 Застосування тунельного діода

Для тунельних діодів можна знайти застосування у таких приладах як підсилювачі (ВЧ, НВЧ, надрегенеративні), генератори гармонічних коливань (генератори підвищеної потужності, генератори НВЧ), детектори (регенеративний детектор, надрегенеративний детектор), перетворювачі частоти.

З усього різноманіття використання тунельного діода найбільш перспективним є їх використання в підсилювачах ВЧ та НВЧ. Це зв'язано з тим, що такі підсилювачі мають низький рівень власних шумів (2-3 дБ) та просту конструкцію. В деяких випадках тунельний діод використовують і для підсилення низьких частот [2].

Основними параметри, які характеризують підсилювач з тунельним діодом: коефіцієнт підсилення, добротність (добуток коефіцієнта підсилення на смугу пропускання) та коефіцієнт шуму. Підсилювальні властивості характеризує коефіцієнт підсилення потужності. Оскільки тунельний діод це двохполюсник, то для такої цілі використовувати звичайне поняття коефіцієнта підсилення потужності неможливо.

В літературі зазвичай використовують номінальний коефіцієнт підсилення потужності K_m , який визначається як відношення потужності сигналу P_H , яка виділяється на навантаженні підсилювача, до потужності P_0 , яку може віддати даний генератор сигналу в узгоджене навантаження. Тому:

$$P_H = \frac{U_H^2}{R_H}, \quad P_0 = \frac{U_\Gamma^2}{4R_\Gamma}, \quad (1.5.1)$$

$$K_m = \frac{P_H}{P_0} = 4 \frac{R_\Gamma}{R_H} \left(\frac{U_H}{U_\Gamma} \right)^2, \quad (1.5.2)$$

Де U_{Γ} та $U_{\text{н}}$ – напруга генератора та навантаження, а R_{Γ} та $R_{\text{н}}$ – опори джерела сигналу та навантаження відповідно. В конкретній схемі вхідний опір підсилюючого елемента може бути не узгодженим з внутрішнім опором генератора, тому номінальний коефіцієнт підсилення характеризує підсилювальні властивості всієї схеми в цілому (генератор, підсилювач, навантаження) з урахуванням на неузгодженість.

Інколи підсилювач характеризують коефіцієнтом внесеного підсилення $K_{\text{вн}}$, який показує величину потужності, яка «вноситься» в схему. Він знаходиться як відношення потужності сигналу, яка виділяється на навантаженні при включеному діоді до потужності в тому ж навантаженні при включеному діоді. Номінальний коефіцієнт підсилення $K_{\text{м}}$ і коефіцієнт внесеного підсилення $K_{\text{вн}}$ зв'язані співвідношенням:

$$K_{\text{м}} = K_{\text{вн}} \frac{4R_{\Gamma}R_{\text{н}}}{(R_{\Gamma} + R_{\text{н}})^2} \quad (1.5.3)$$

При $R_{\Gamma} = R_{\text{н}}$ $K_{\text{м}} = K_{\text{вн}}$, у всіх інших випадках $K_{\text{м}} < K_{\text{вн}}$

Коефіцієнтом підсилення по напрузі вважають відношення напруги на вході підсилювача $U_{\text{в}}$ до ЕРС джерела сигналу U_{Γ} :

$$K_{\text{н}} = \frac{U_{\text{в}}}{U_{\Gamma}} \quad (1.5.4)$$

Визначення коефіцієнту підсилення по напрузі як відношення напруг на виході і вході підсилювача втрачає сенс при розгляді двополюсника. Коефіцієнт підсилення по напрузі однозначно зв'язаний з коефіцієнтом підсилення потужності:

$$K_{\text{н}} = \frac{1}{2} \sqrt{K_{\text{м}} \frac{R_{\text{н}}}{R_{\text{п}}}} \quad (1.5.5)$$

Зазвичай коефіцієнт підсилення виражається в децибелах. Коефіцієнт підсилення по напрузі, виражений в децибелах дорівнює $20\lg K_v$, а коефіцієнт підсилення потужності – $10\lg K_M$.

Рівень мінімального підсилюючого сигналу обмежується власними шумами підсилювача. Шум, який створює тунельний діод, можна показати в вигляді трьох джерел шуму: дробового, теплового та стихаючий.

Дробовий шум це головний шум тунельного діода. Він створюється постійним струмом, який протікає через діод при роботі підсилювача. Дробовий шум має суцільний спектр і може бути представлений в вигляді джерела струму $i_{др}$:

$$i_{др} = 2eI_v\Delta f \quad (1.5.6)$$

де e – заряд електрона;

Δf – смуга пропускання підсилювача на рівні 3дб.

Тепловий шум в паразитному послідовному опорі втрат r_d тунельного діода може бути представлений в вигляді джерела ЕРС e_T :

$$e_T = 4kTr_d\Delta f \quad (1.5.7)$$

де e_T – ЕРС теплових шумів;

k – постійна Больцмана;

T – абсолютна температура опору втрат, [K].

Для зменшення впливу теплового шуму необхідно мати найменше відношення $r_d/|R_d|$. Зазвичай це відношення дорівнює 0,1- 0,3.

В діапазоні звукових частот проявляється також шум, спектральна густина якого зменшується по закону $1/f$. Тобто стихаючий шум, зв'язаний з струмом втрат переходу. На частотах вище 1 кГц ця шумова компонента дуже мала порівняно з іншими.

Еквівалентна схема тунельного діода з урахуванням шумів представлена на рис. 3. Дробовий шум є основним вкладом в величину загального шуму тунельного діода вже при $r_d/|R_d| = 0,1 - 0,3$. Дробовий шум характеризується шумовою складовою, яка приблизно дорівнює $20I_0|R_d|$. Шумові властивості підсилювача визначаються коефіцієнтом шуму F . Він дорівнює відношенню потужності шумів на виході реального підсилювача до потужності на виході ідеального (без власних шумів) підсилювача. В іншому випадку коефіцієнт шуму визначає на скільки підсилювач погіршує відношення:

$$F = \frac{(\text{сигнал/шум})_{\text{вх}}}{(\text{сигнал/шум})_{\text{вих}}}, \quad (1.5.8)$$

Еквівалентна схема підсилювача з врахуванням шумів представлена на рис.4. Коефіцієнт шуму підсилювача можна представити в вигляді

$$F = 1 + \frac{g_1}{g_r} + \frac{g_n}{g_r} + \frac{g_e}{g_r} \quad (1.5.9)$$

де g_1 – провідність власних втрат діода і контура підсилювача;

g_n – провідність навантаження;

g_e – еквівалентна шумова провідність діоду;

g_r – провідність генератора;

$$g_e = \frac{eI_0}{2kT}. \quad (1.5.10)$$

При $T = 300^\circ\text{K}$ g_e дорівнює $0,02I_0R_d$, де I_0 виміряний в міліамперах. При слабкому зв'язку з навантаженням для коефіцієнта шуму спрощується:

$$F = 1 + 0.02I_0R_d \quad (1.5.11)$$

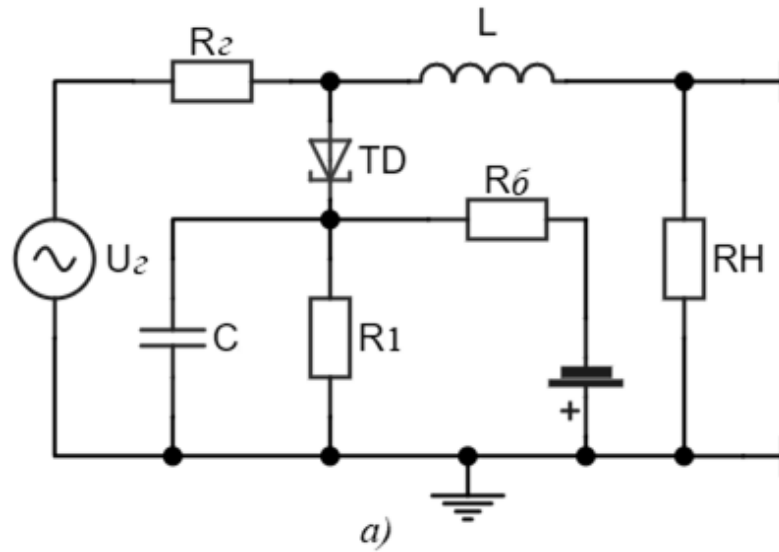


Рис. 1.5.1. Принципова схема широкопasmового підсилювача

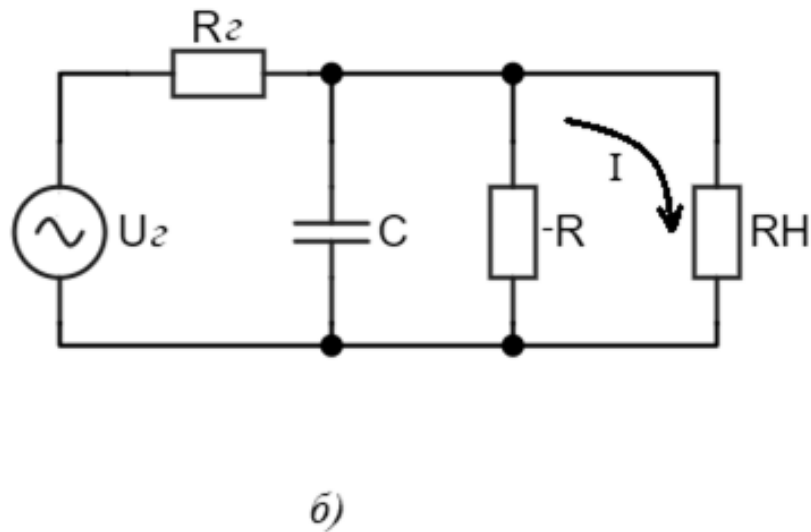


Рис. 1.5.2. Еквівалентна схеми широкопasmового підсилювача

Напруга на діоді, відповідна мінімальному значенню коефіцієнту шуму F , не співпадає з тією напругою, при якій значення від'ємного опору тенульного діода мінімальну, а більше за нього на 10-20 мВ.

В широкопasmовому підсилювачі коефіцієнт шуму на всіх частотах залишається обмеженою величиною. Для резонансного підсилювача

коефіцієнт шуму необмежено зростає при наближенні робочої частоти підсилювача до критичної ($f_{кр}$).

Для повної характеристики підсилювача з тунельним діодом вводять величину M , яка визначає як підсилюючі, так і шумові властивості схеми.

$$M = \frac{F - 1}{1 - \frac{1}{K_M}} \quad (1.5.12)$$

Підсилювач повинен бути розрахований так, щоб M мало мінімальне значення.

2. ПОСЛІДОВНЕ ЗУСТРІЧНЕ ВКЛЮЧЕННЯ ТУНЕЛЬНИХ ДІОДІВ

За послідовного зустрічного з'єднання двох тунельних діодів (рис.2.1) виникає симетрична вольт-амперна характеристика рис.2.2.

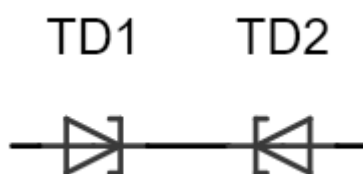


Рис.2.1 Послідовне зустрічне з'єднання двох тунельних діодів

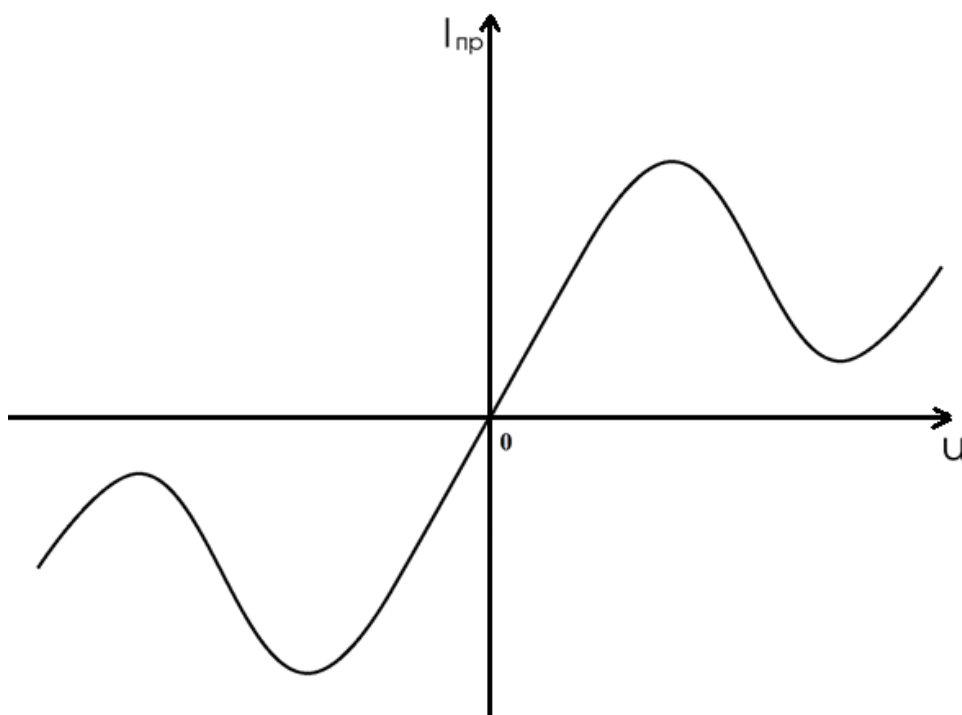


Рис.2.2. Результуюча вольт-амперна характеристика двох послідовно зустрічно включених тунельних діодів

Роботу такого з'єднання можна пояснити використовуючи зонні діаграми. По результуючій вольт-амперній характеристиці можна побачити,

що для опису роботи достатньо пояснити тільки додатну гілку, оскільки характеристика симетрична.

ВАХ такого з'єднання, як і ВАХ тунельного діоду, буде мати 6 точок (рис.2.3) по яким можна описати його роботу.

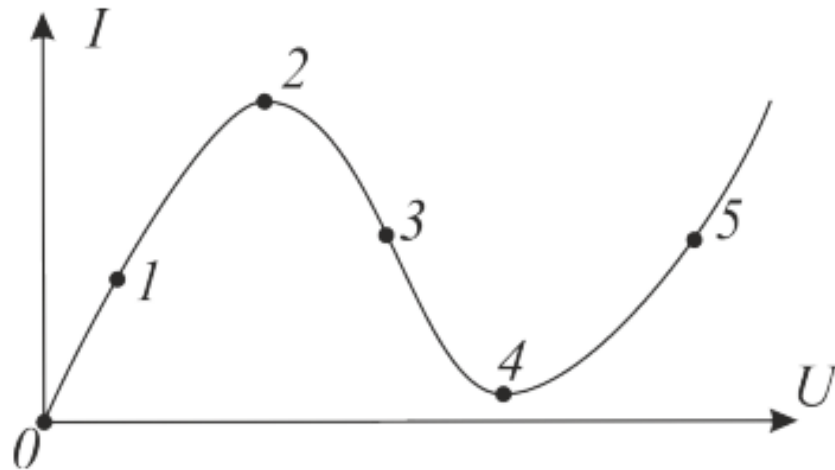


Рис.2.3. Прямая гілка ВАХ послідовного зустрічного з'єднання [13]

Якщо до з'єднання не прикладається зовнішня напруга (точка 0 на рис.2.3), то загальний струм через нього дорівнює нулю, це видно на енергетичній діаграмі з'єднання рис.2.4.

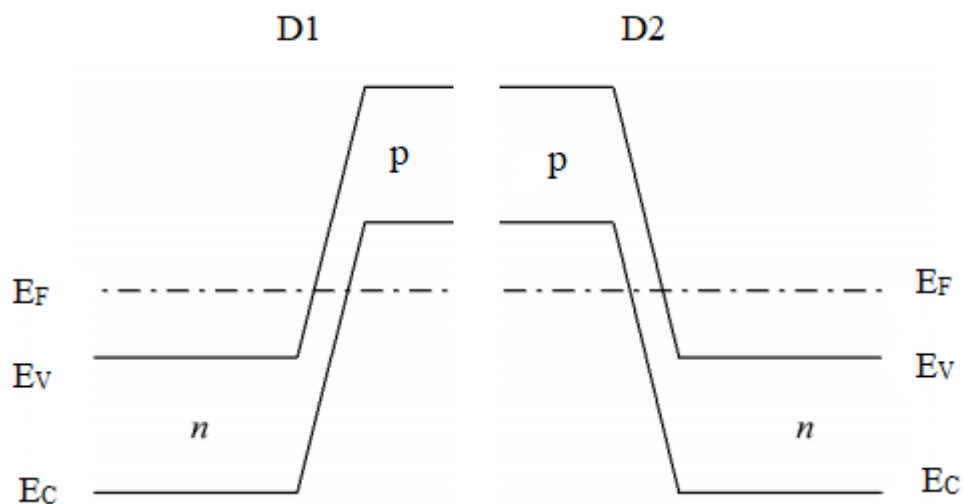


Рис.2.4. Енергетична діаграма послідовного зустрічного з'єднання за відсутності зовнішньої напруги

Енергетичні зони почнуть викривлятися якщо прикласти до з'єднання невелику зовнішню напругу (точка 1 на рис.2.3). Через це збільшується перекриття енергетичних зон тунельного переходу другого діода. У той же час частина заповнених рівнів зони провідності в n-області першого діода та незаповнених рівнів валентної зони р-області перекриваються (рис. 2.5), через з'єднання починає протікати тунельний струм.

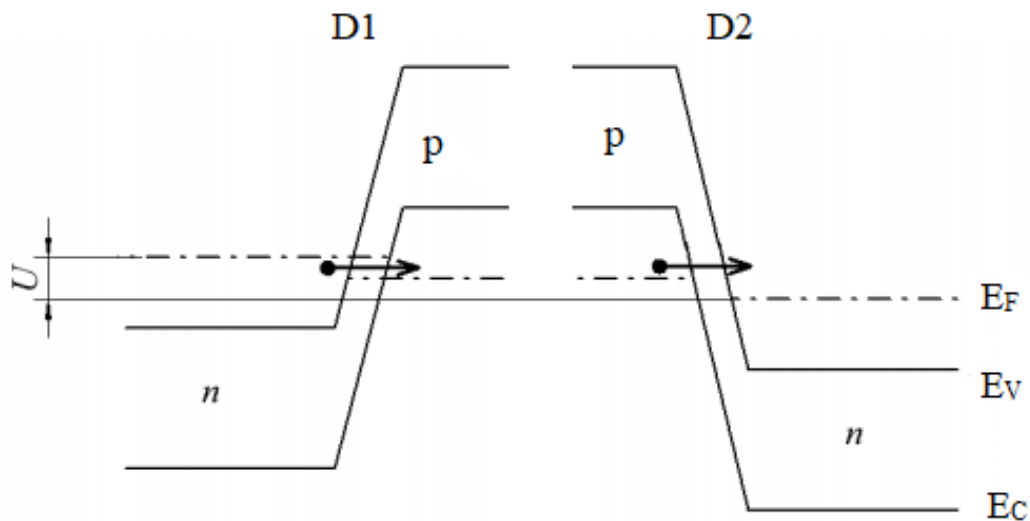


Рис.2.5 Енергетична діаграма послідовного зустрічного з'єднання за прикладенні невеликої зовнішньої напруги

При збільшенні зовнішньої напруги збільшиться і перекриття між заповненими рівнями зони провідності першого діода n-області та пустими рівнями валентної зони р-області, тому струм збільшуватиметься, доки не дійде до напруги піку (точка 2 на рис.2.3). Ця точка є піком ВАХ послідовного з'єднання тунельних діодів, її описують максимальним перекриттям зон (рис.2.6).

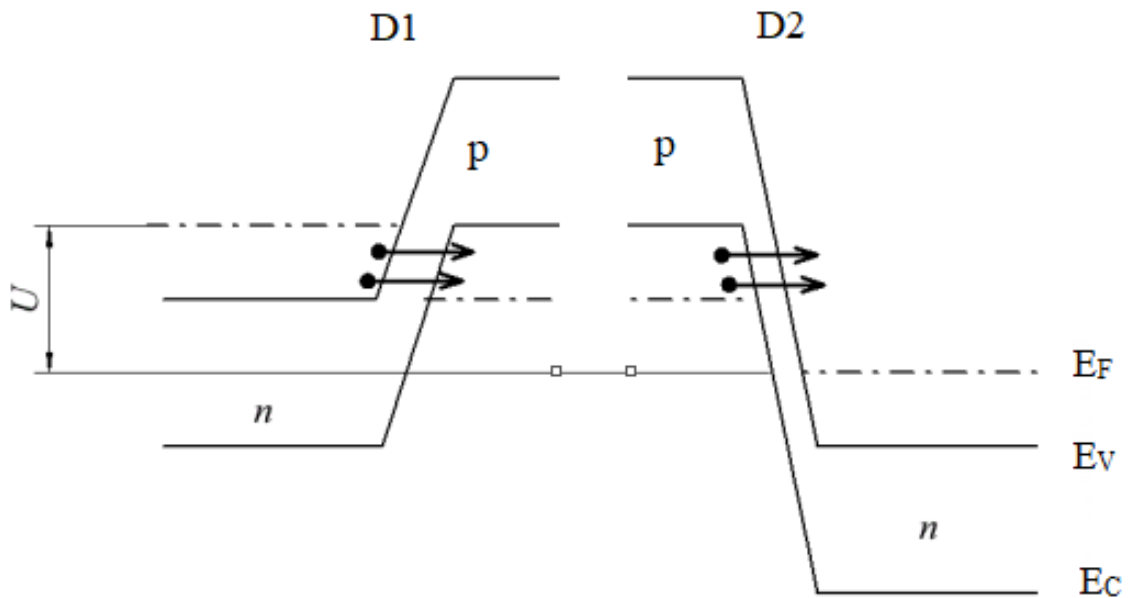


Рис.2.6 Енергетична діаграма послідовного зустрічного з'єднання за напруги піку, працюючої на основі тунельного ефекту

Подальше збільшення зовнішньої напруги призведе до зменшення струму (точка 3 на рис.2.3). Такі зміни відбуваються через те, що перекриття між заповненими рівнями зони провідності першого діоду n-області та пустими рівнями валентної зони р-області стає меншим (рис. 2.7).

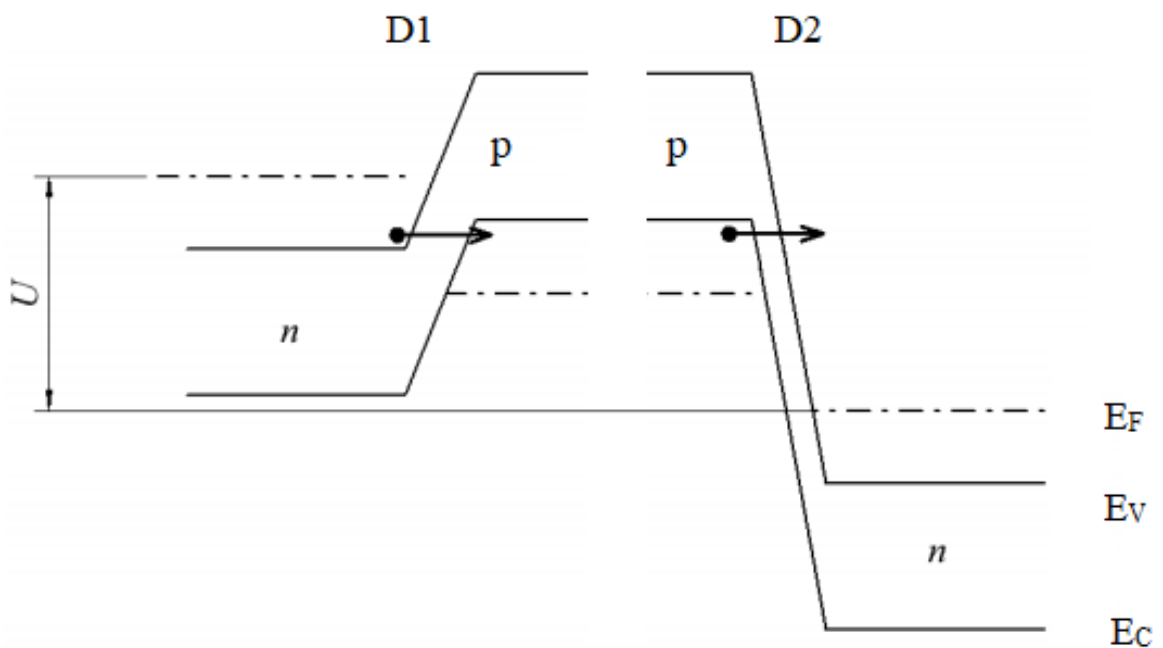


Рис.2.7 Енергетична діаграма послідовного зустрічного з'єднання за напруги

між напругою точки піку та впадини, працюючої на основі тунельного ефекту

По мірі зменшення перекриття між зоною провідності першого діода та пустими порожніми рівнями його валентної зони (рис. 2.8), буде зменшуватися струм. Напруга ж досягатиме впадини (точка 4 на рис.2.3). Між точками 0 та 4 на вольт-амперній характеристиці проходить тунельний струм через обидва діоди. Його обмежує тільки струм, через прямо зміщений p-n перехід.

При подальшому збільшенні напруги, починає працювати робота над бар'єрний механізм переносу заряду. Тут величина струму так само обмежується кількістю носіїв, які можуть подолати потенціальний бар'єр першого тунельного діоду.

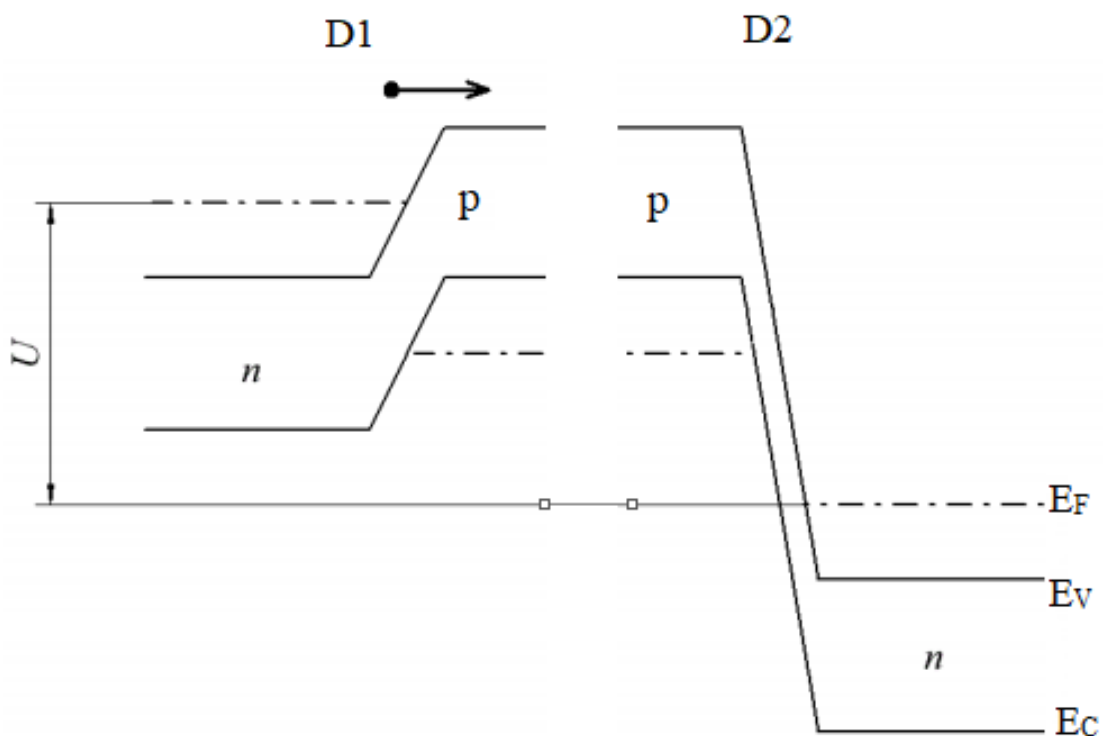


Рис.2.8 Енергетична діаграма послідовного зустрічного з'єднання за напруги в точці впадини, працюючої на основі тунельного ефекту

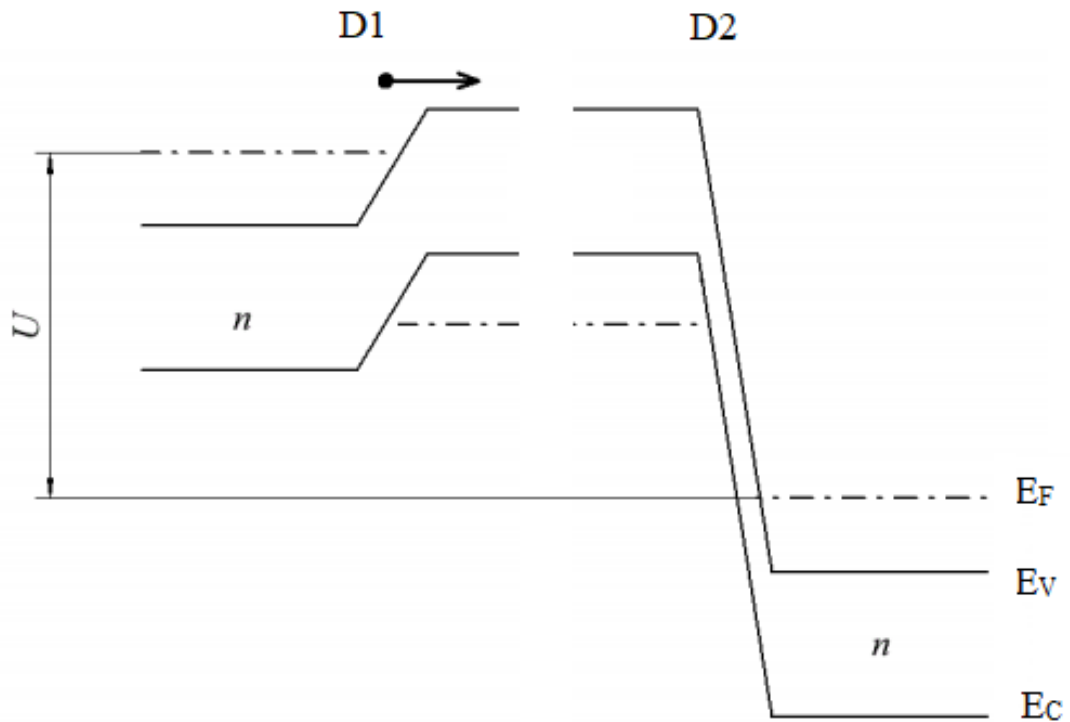


Рис.2.9 Енергетична діаграма послідовного зустрічного з'єднання за напруги в більший ніж напруга впадини, працюючої на основі тунельного ефекту

Для вольт-амперних характеристик послідовно зустрічно ввімкнених тунельних діодів у роботі [14] були виведені формули для розрахунку кожної ділянки.

Для опису першої ділянки між точками 0 та 2 на рис.2.3 застосовуються формули:

$$U = \begin{cases} \varphi_T \ln \left(1 + \frac{I}{I_0} \right) + U_b \cdot \left(1 - \frac{I}{I_0} \right)^{\frac{1}{m}}, & I \geq 0; \\ -\varphi_T \ln \left(1 - \frac{I}{I_0} \right) - U_b \cdot \left(1 + \frac{I}{I_0} \right)^{\frac{1}{m}}, & I < 0; \end{cases}, \quad (2.1)$$

де φ_T – температурний потенціал, I_0 – тепловий струм, U_b – напруга пробою, m – стала, що визначається матеріалом високоомної області p-n переходу.

Для другої ділянки (між точками 2 та 4 на рис.2.3) зі спадом струму, через дію від’ємного диференціального опору та зменшення тунельного струму є вплив на графік вольт-амперної характеристики тунельного діоду, тому формули набувають вигляду:

$$U = \begin{cases} \varphi_T \ln \left(1 + \frac{I}{I_0} \right) + U_b \cdot \left(1 + \frac{I}{I_0} \right)^{\frac{1}{m}}, & I \geq 0; \\ -\varphi_T \ln \left(1 - \frac{I}{I_0} \right) - U_b \cdot \left(1 + \frac{I}{I_0} \right)^{\frac{1}{m}}, & I < 0; \end{cases}, \quad (2.2)$$

До третьої (починаючи з точки 4 на рис.2.3), останньої, ділянки вольт-амперної характеристики використовують формули (2.3). В них враховано струм піку, тому що там графік починається з точки, яка відповідає струму піку. Все інше буде відповідати формулам (2.1), оскільки тунельний струм почне зростати на цій ділянці.

$$U = \begin{cases} I_p + \varphi_T \ln \left(1 + \frac{I}{I_0} \right) + U_b \cdot \left(1 - \frac{I}{I_0} \right)^{\frac{1}{m}}, & I \geq 0; \\ I_p - \varphi_T \ln \left(1 - \frac{I}{I_0} \right) - U_b \cdot \left(1 + \frac{I}{I_0} \right)^{\frac{1}{m}}, & I < 0; \end{cases}, \quad (2.3)$$

Для розрахунку точок 2 та 4 (рис.2.3) враховують значення струму піку I_p та струму впадини I_v , які розраховують за такими формулами:

$$I_p = eSnD \sqrt{\frac{E_m - E_c}{2m}}, \quad (2.4)$$

$$I_v = \frac{I_p}{8}. \quad (2.5)$$

Де e - заряд електрона, S - площа р-п переходу, n - концентрація електронів та дірок, D – коефіцієнт проходження, E_c – енергія дна зони провідності, E_m – енергія, яка відповідає максимуму функції розподілу електронів в зоні провідності, m – ефективна маса електрона.

Для знаходження напруги пробною U_b та теплового струму I_0 вкористовували формули:

$$U_b = 40\rho_n + 8\rho_p, \quad (2.6)$$

$$I_0 = eS \cdot \frac{D_n p_i^2}{W_p N_D} \quad (2.7)$$

де D_n – коефіцієнт дифузії електронів, N_D – концентрація домішок, ρ_n та ρ_p – питомий опір в n – та p – областях.

3. ПОСЛІДОВНЕ СПІВНАПРЯМЛЕНЕ З'ЄДНАННЯ ТУНЕЛЬНИХ ДІОДІВ

3.1 Перший випадок співнапрявленого з'єднання тунельних діодів

При розгляді першого випадку наша схема (Рис.3.1.1) складається з двох тунельних діодів в яких вольт-амперні характеристики абсолютно однакові

Рис.3.1.2

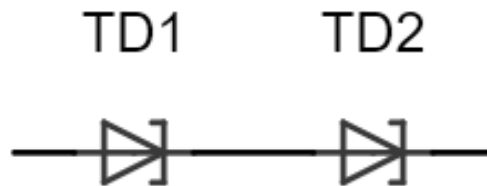


Рис.3.1.1 Послідовне співнапрявлене з'єднання двох тунельних діодів

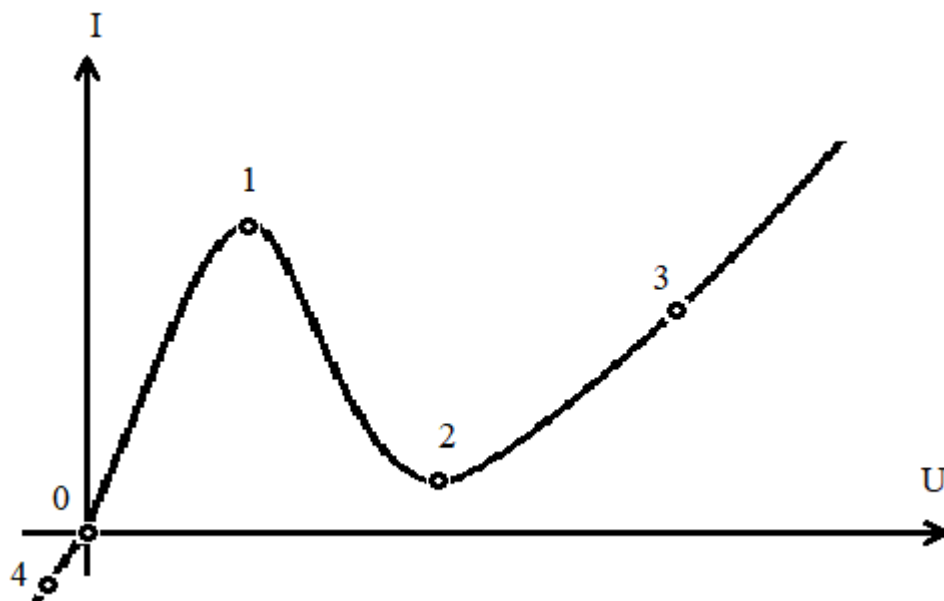


Рис.3.1.2 Результуюча вольт-амперна характеристика двох послідовно співнапрявлено включених тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ

З'єднавши два таких тунельних діода та проаналізувавши результуючу вольт-амперну характеристику (Рис. 3.1.2.) такого з'єднання ми побачимо, що характеристика розтягується по осі напруг. Щоб детальніше розглянути принцип роботи цього з'єднання скористаємося зонними діаграмами, аналізуючи ситуації, які відмічені точками на результуючій ВАХ.

При відсутності зовнішньої напруги області тунельних діодів з вільними електронами та області з вільними станами не перекриваються по енергіях (Рис.3.1.4), тобто в такій ситуації через з'єднання не протікає тунельний струм, що відповідає ситуації позначеній точкою 0 на результуючій ВАХ рис.3.1.2.

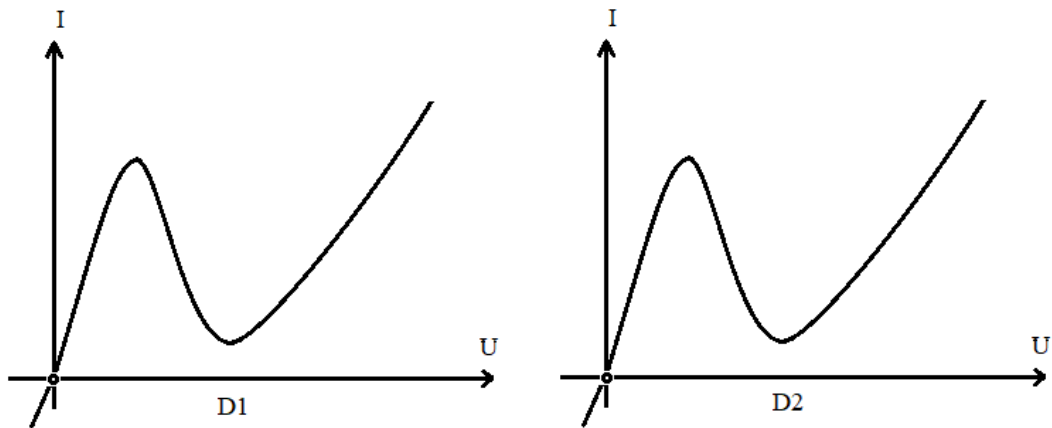


Рис. 3.1.3. ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ за відсутності зовнішньої напруги

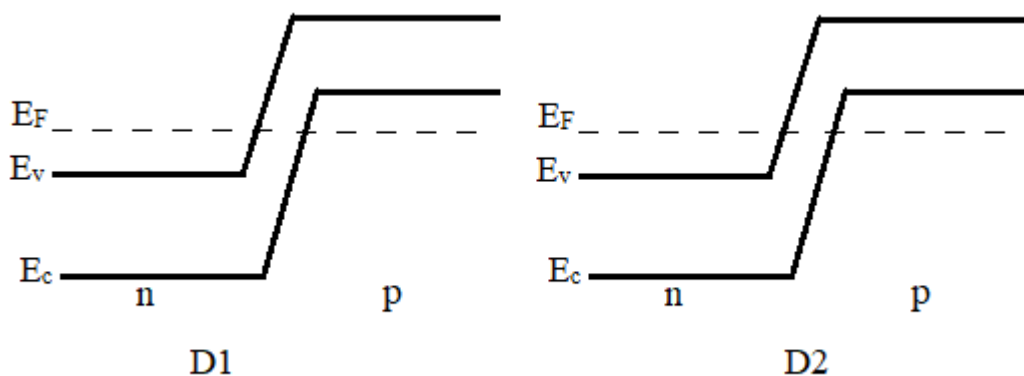


Рис. 3.1.4. Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ за відсутності зовнішньої напруги

Якщо на з'єднання подати напругу у зворотному напрямі то вільні рівні в зонах провідності n-областей тунельних діодів розміщуються навпроти зайнятих рівнів валентної зони р-області тих же діодів, а також зайняті рівні зони провідності n-області — навпроти абсолютно зайнятих рівнів валентної зони р області (Рис.3.1.6). Це призводить до протікання тунельного струму через з'єднання, ситуація відзначена точкою 4 на рис.3.1.2.

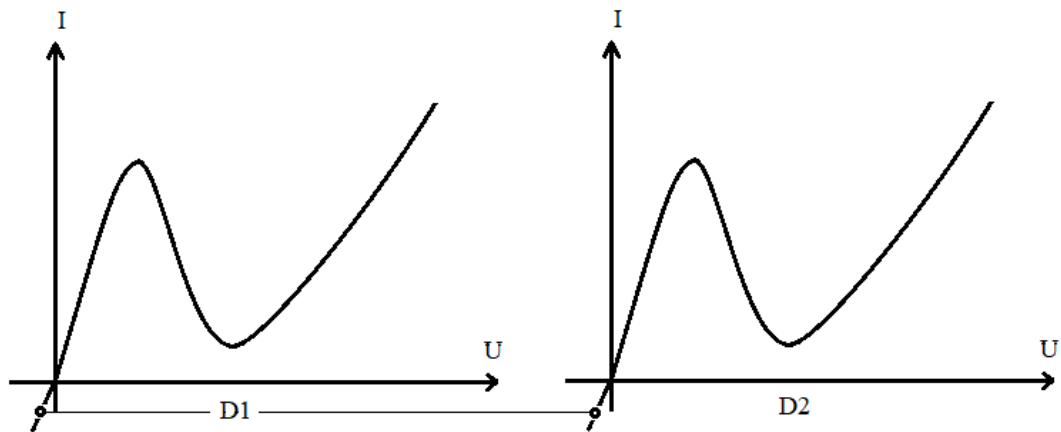


Рис. 3.1.5. ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ за зворотного зміщення

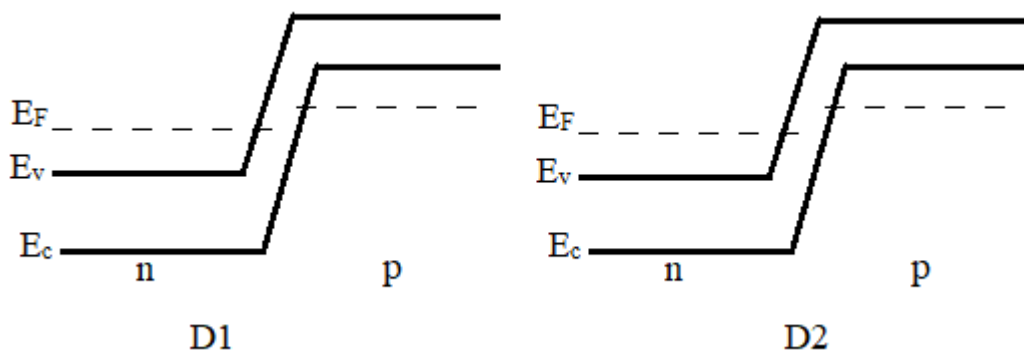


Рис. 3.1.6. Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ за зворотного зміщення

Подаючи на з'єднання зовнішню напругу у прямому зміщенні струм через з'єднання буде зростати разом з напругою, оскільки заповнені стани з n-

сторони та вільні стани з р-сторони (Рис. 3.1.8). При максимальному перекритті цих енергетичних зон через з'єднання буде протікати максимальний тунельний струм(точка 1 на рис.3.1.2).

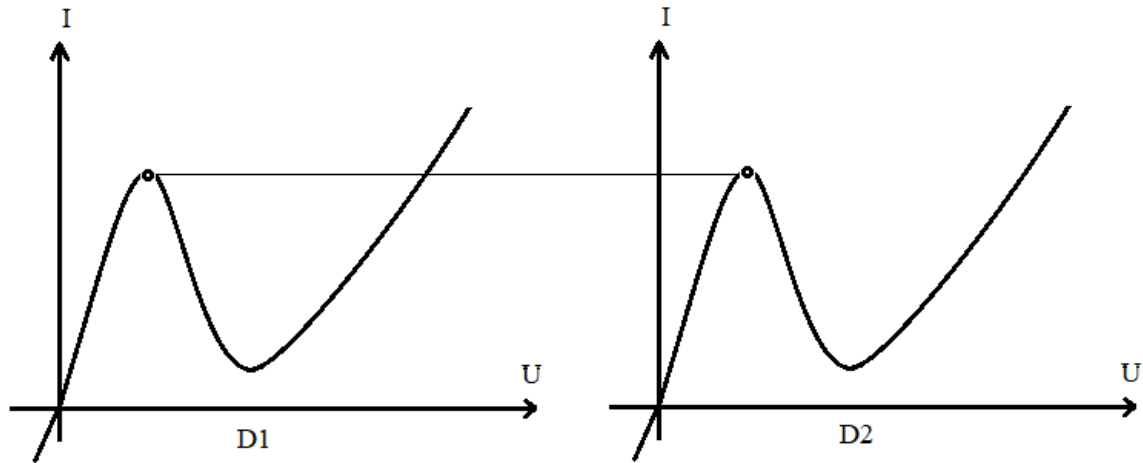


Рис. 3.1.7. ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ за напруги піку

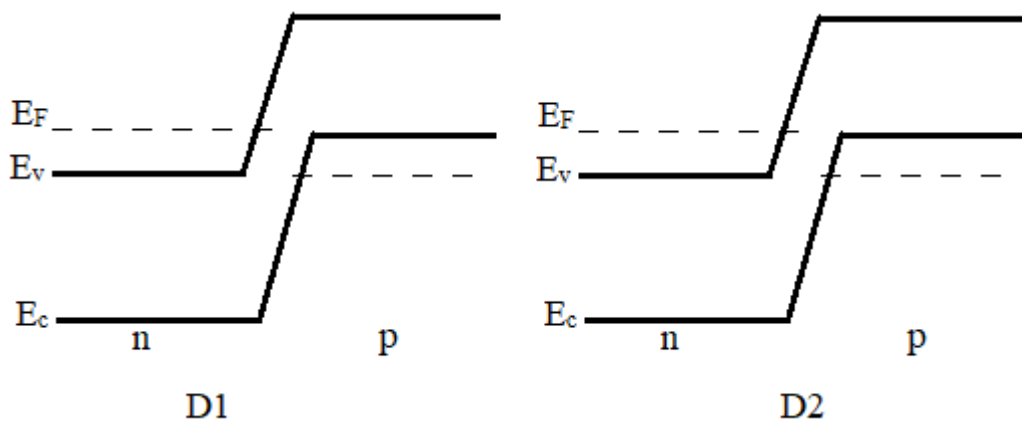


Рис. 3.1.8. Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ за напруги піку

При наступному збільшенні прямого зміщення кількість вільних рівнів з р-сторони, що мають ту ж енергію, зменшується, оскільки зона валентності n-областей починає перекривається по енергіям з забороненою зоною (Рис.3.1.10) де станів для електронів немає, тобто перехід туди неможливий. Тунельний струм починає поступово зменшуватися до точки 2 на рис.3.1.2. В

цій точці валентні зони n-областей тунельних діодів починають повністю перекривати заборонені зони р-областей, що означає припинення тунелювання носіїв.

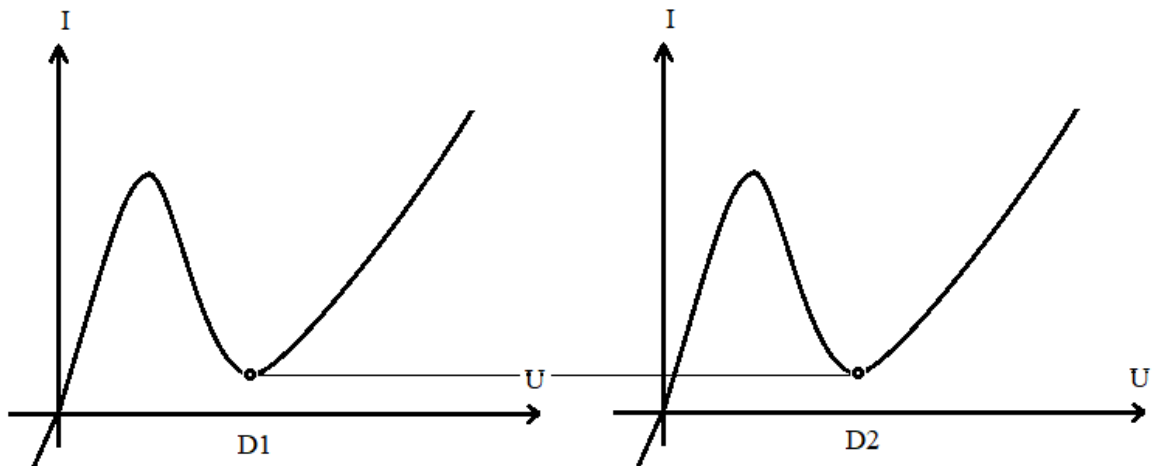


Рис. 3.1.9. ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ за напруги впадини

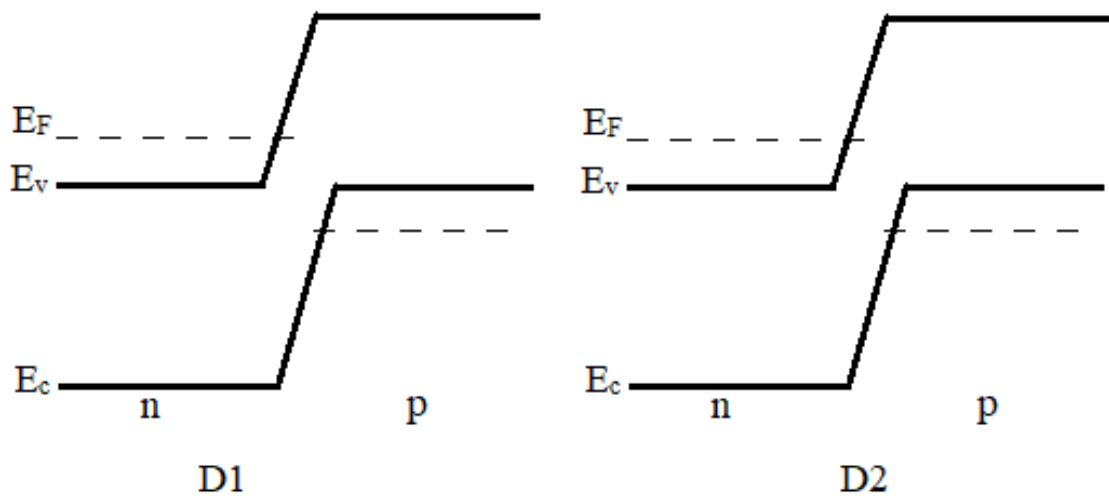


Рис. 3.1.10. Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ за напруги впадини

Але при такій ситуації повний струм не досягає нуля, оскільки присутня компонента струму, яка обумовлена надбар'єрними переходами електронів і дірок. У точці мінімуму цей струм малий тому, що потенціальний бар'єр для носіїв ще досить високий.

При подальшому збільшенні значення прямого зміщення почне зростати дифузійний струм який проходить через з'єднання тунельних діодів, такі зміни відображені на результуючій ВАХ на рис.3.1.2. Зонні діаграми такої ситуації представлені на рис. 3.1.12.

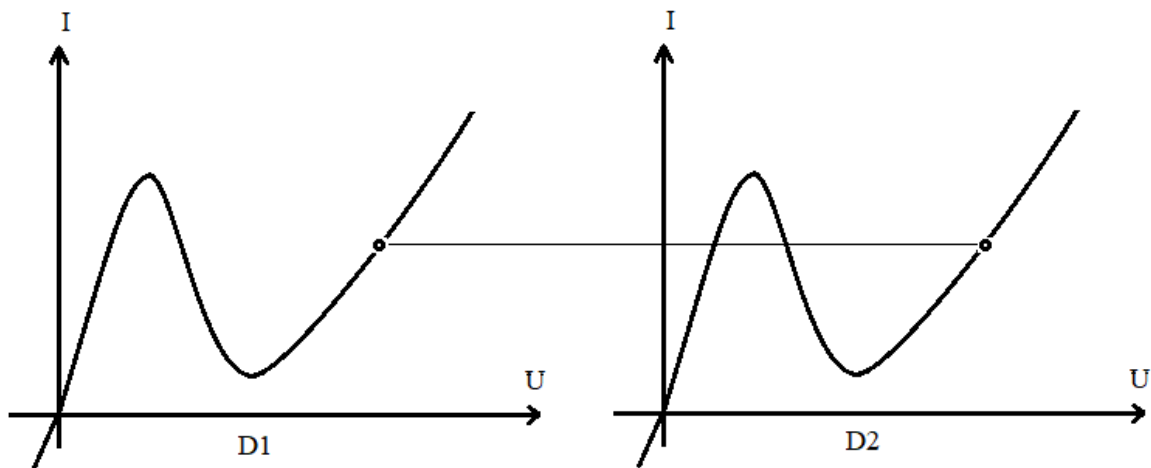


Рис. 3.1.11. ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ за напруги при якій починає протікати дифузійний струм

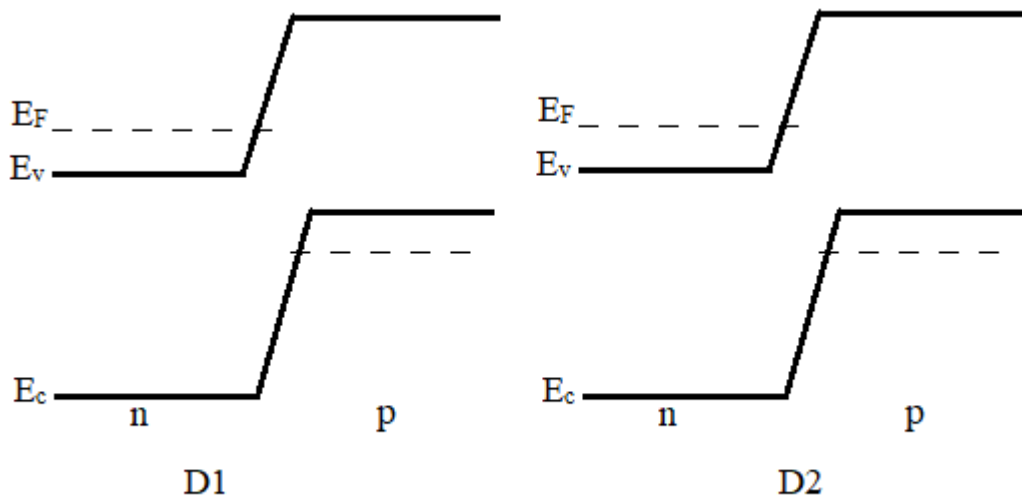


Рис. 3.1.12. Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно однаковими ВАХ за напруги при якій починає протікати дифузійний струм

Отже як висновок потрібно зазначити, що вольт-амперна характеристика має таке розтягнення по напрузі, тому що тунельні діоди ввімкнені послідовно, а також саме через те, що вони мають абсолютно однакові ВАХ і всі процеси у двох тунельних діодах відбуваються одночасно.

Варто зазначити, що результуюча ВАХ такого з'єднання буде розтягуватися по напрузі в стільки раз, скільки тунельних діодів включено послідовно. Проблемою такого з'єднання є те, що виготовити тунельні діоди з абсолютно ідентичними ВАХ майже не можливо.

3.2 Другий випадок співнапрявленого з'єднання тунельних діодів

Щоб розглянути другий випадок коли вольт-амперні характеристики двох тунельних діодів відрізняються одна від одної проведемо експеримент.

Для вимірювання вольт-амперної характеристики послідовно співнапрявлено включених двох тунельних діодів використаємо стенд, який складається з блока живлення з постійним струмом (5В, 5мА), вольтметра V1, вольтметра V2 та робочого макета з послідовно з'єднаними тунельними діодами. Робочий макет складається з двох резисторів R1 (100 Ом) та R2 (10 Ом) та двох тунельних діодів TD1 та TD2.

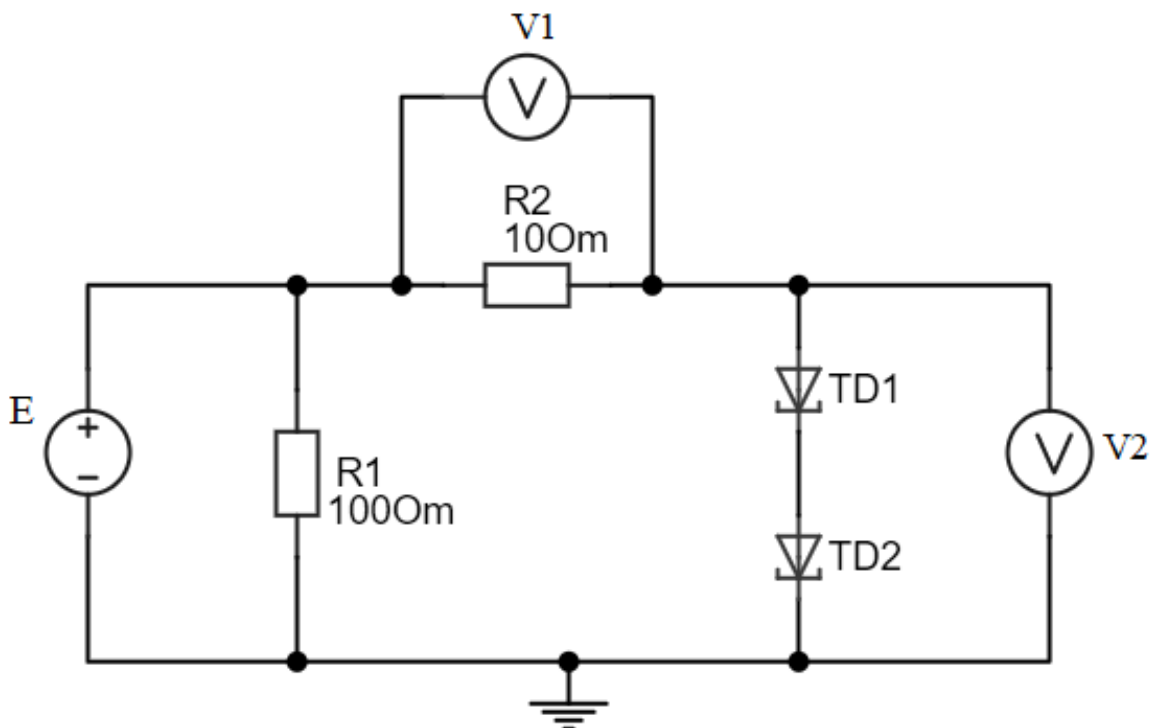


Рис. 3.2.1. Схема вимірювального стенду ВАХ послідовно включених двох тунельних діодів.

У таблицях наведені дані, які отримані після проведення експерименту та побудовано графік на їх основі.

U, B	0	0,2	0,5	0,6	0,9	1,1	1,2	1,28	1,4
I, mA	0	0,4	0,83	0,95	1,28	1,46	1,5	1,4	0,12

1,52	1,61	1,75	1,84	1,9	2,13	2,22	2,28	2,34	2,37
0,145	0,192	0,3	0,4	0,48	1,02	1,3	1,4	0,24	0,25

2,46	2,54	2,63	2,75	2,84	2,95	3,07	3,16	3,22	3,28	3,36
0,3	0,37	0,44	0,54	0,69	0,86	1,08	1,3	1,5	1,7	2,9

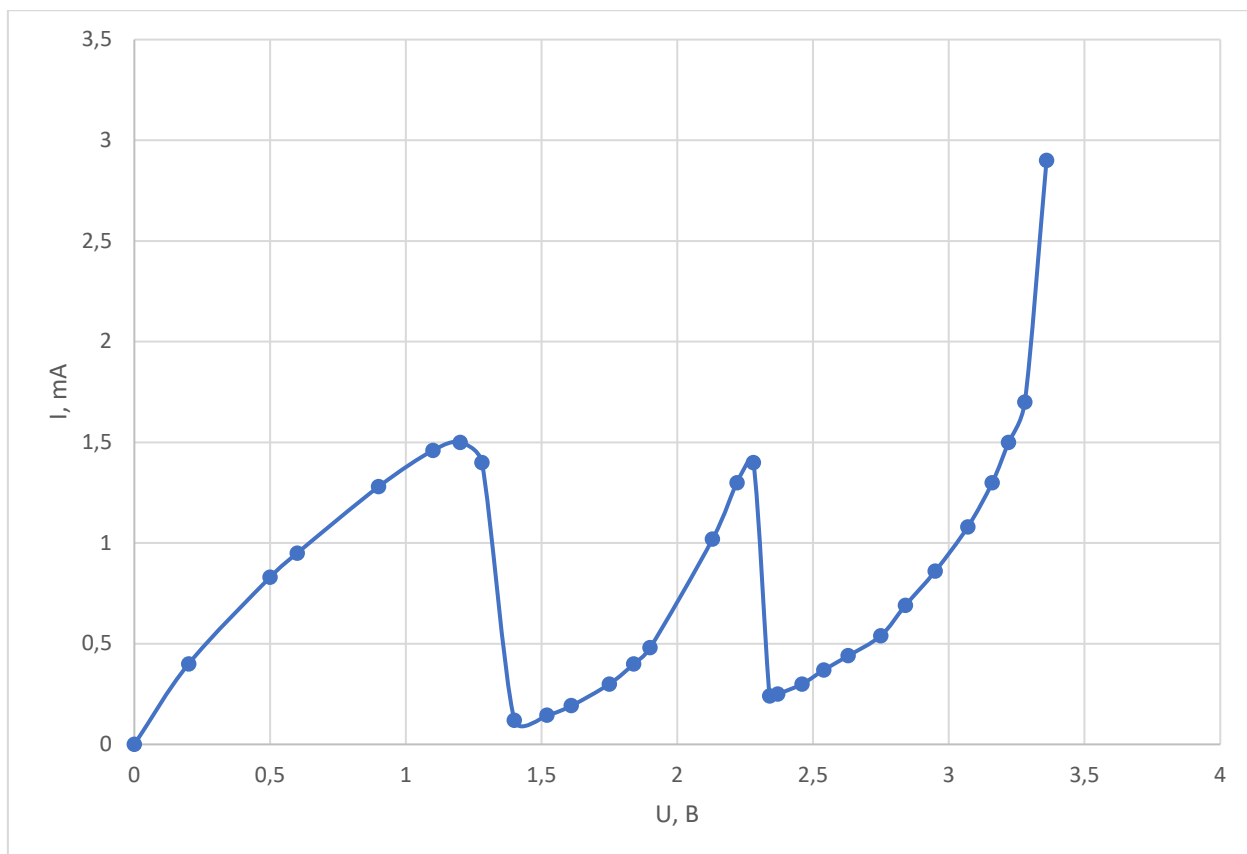


Рис. 3.2.2. Експериментально визначена ВАХ послідовно включених тунельних діодів.

Перед початком опису роботи такої структури відмітимо на її вольт-амперній характеристиці деякі точки, як це робили у випадку зустрічного з'єднання (Рис.3.2.3)

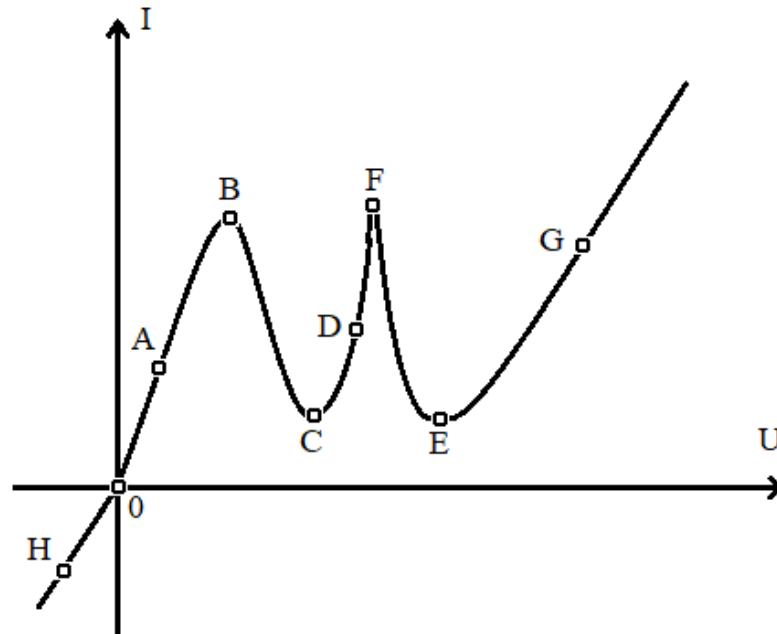


Рис.3.2.3 ВАХ послідовного співпрямленого послідовного з'єднання тунельних діодів

Для опису роботи з'єднання скористаємося енергетичними діаграмами.

При відсутності зовнішньої напруги (точка 0 на Рис.3.2.3) струм який протікає через тунельні діоди буде дорівнювати нулю. Це видно на енергетичній діаграмі рис.3.2.5.

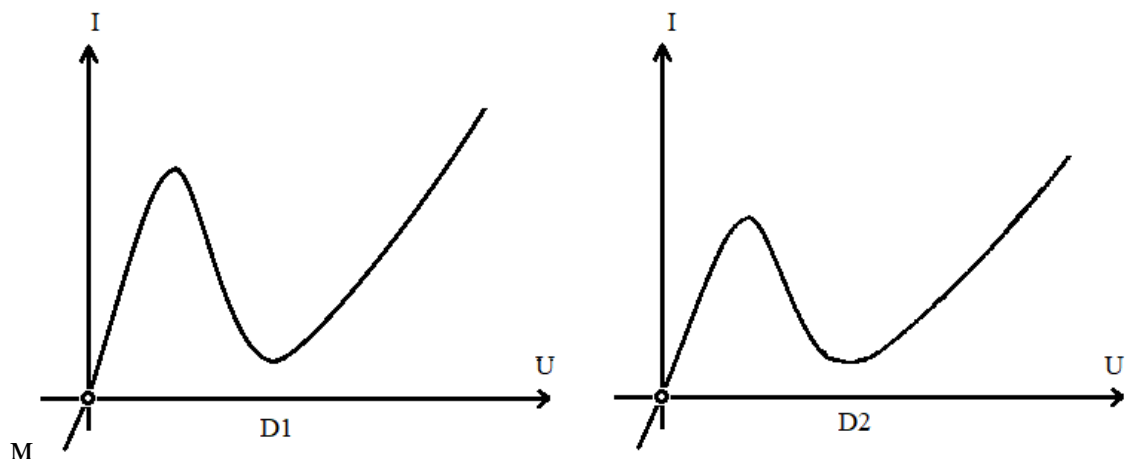


Рис.3.2.4. ВАХ послідовного співнапряженого з'єднання за відсутності зовнішньої напруги

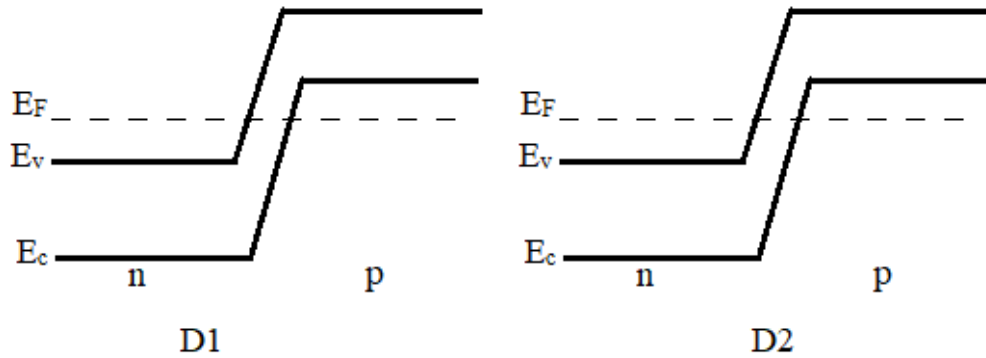


Рис.3.2.5. Енергетична діаграма послідовного співнапряженого з'єднання за відсутності зовнішньої напруги

Викривлення енергетичних зон викликає невелике зовнішнє зміщення (точка А на Рис.3.2.3). Внаслідок перекривання (Рис.3.2.7) заповнених рівнів зони провідності в n- області та незаповнених рівнів в р- області тунельних діодів починає протікати тунельний струм.

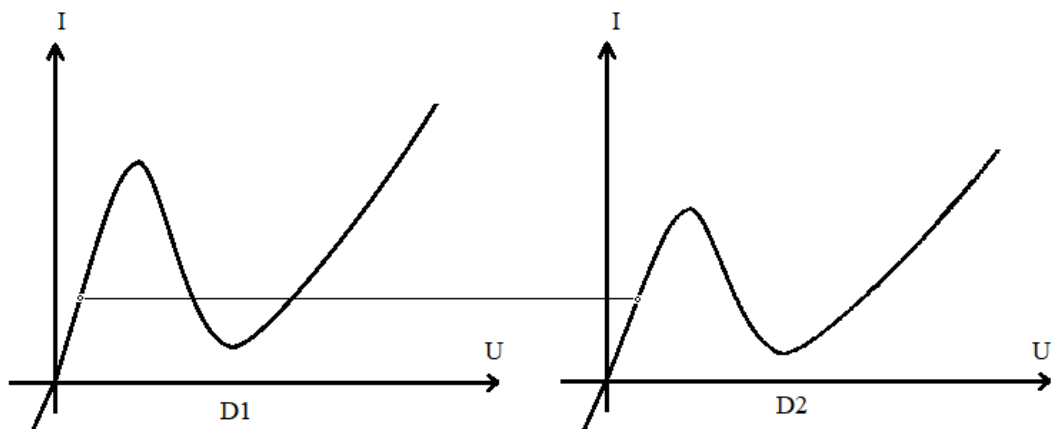


Рис.3.2.6 ВАХ послідовного співнапряженого з'єднання за прикладенні невеликої зовнішньої напруги

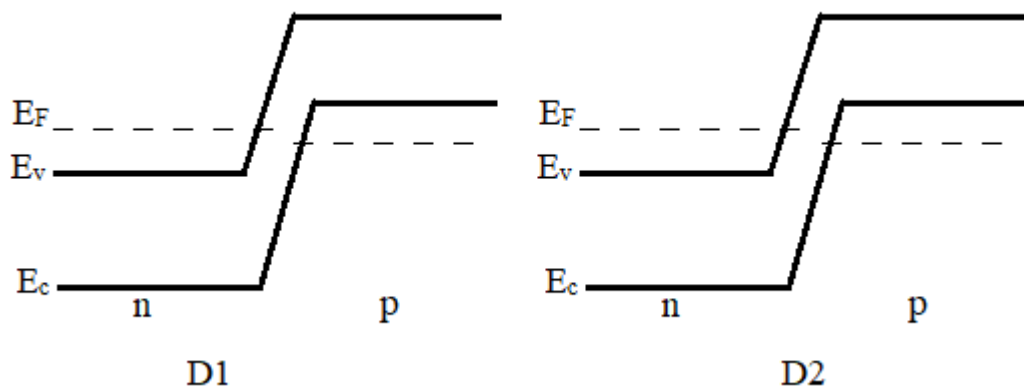


Рис.3.2.7 Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання за прикладенні невеликої зовнішньої напруги

Після подачі прямого зміщення на послідовно з'єднані тунельні діоди, струм та напруга на них почне зростати до точки В на Рис.3.2.3. Діод D2 вийде на пік своєї ВАХ, що і буде першим піком на результуючій ВАХ послідовного з'єднання. Зміни на зонній діаграмі та ВАХ тунельних діодів зображено на рис. 3.2.8 та рис. 3.2.9.

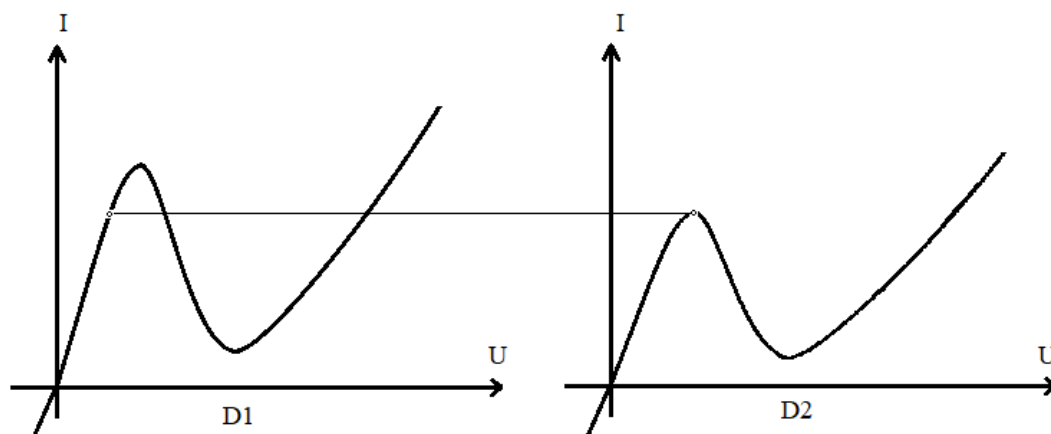


Рис.3.2.8 ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання за напруги піку другого D2 тунельного діоду

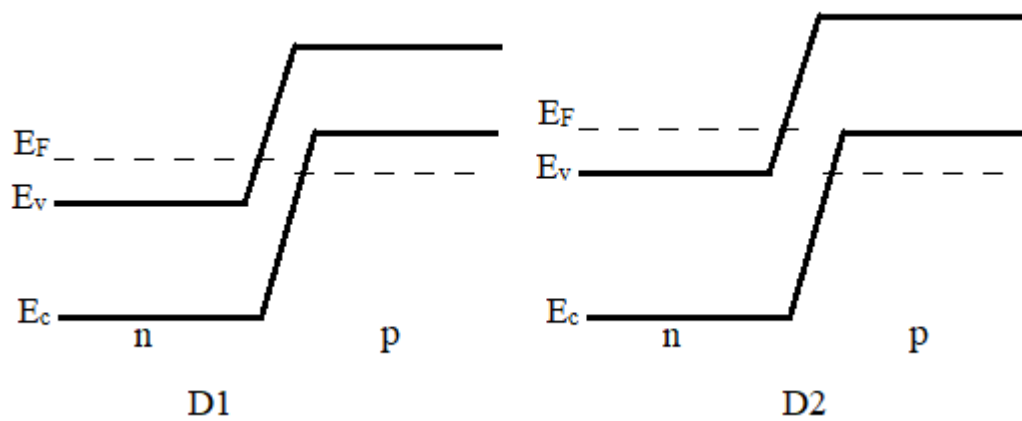


Рис.3.2.9 Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання за напруги піку другого D2 тунельного діоду

Після досягнення цієї точки діод D2 перейде в нестійку зону ВАХ, тобто струм через нього різко впаде, а напруга в свою чергу зросте. В свою чергу через діод D1 протікає той самий струм, що на діоді D2 (рис.3.2.11), тобто він знаходиться на стабільному проміжку вольт-амперної характеристики. Ця ситуація відповідає точці С на рис.3.2.3.

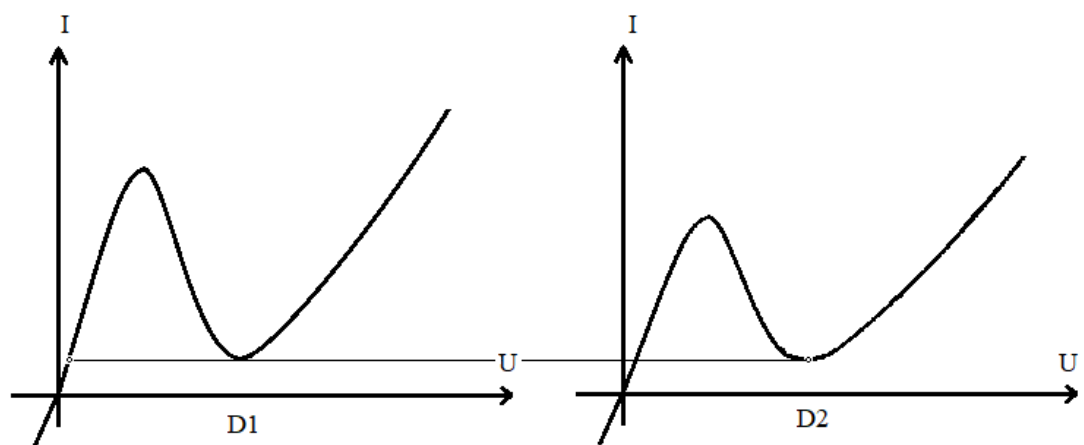


Рис.3.2.10 ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання за напруги впадини другого D2 тунельного діоду

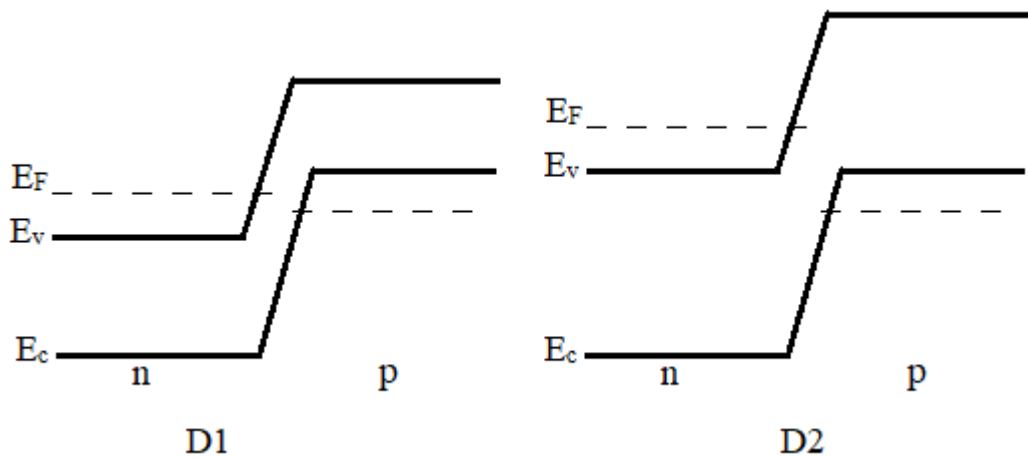


Рис.3.2.11 Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання за напруги впадини другого D2 тунельного діоду

Коли напруга прямого зміщення, яка подана на з'єднання двох тунельних діодів стає більшою за напругу впадини другого діода D2, струм починає поступово зростати. Внаслідок подальшого перекривання (Рис.3.2.13) заповнених рівнів зони провідності в n- області та незаповнених рівнів в р- області першого тунельного діода D1 починає протікати тунельний струм, який дорівнює струму на другому діоді D2. Ця ситуація відповідає точці D на рис. 3.2.3.

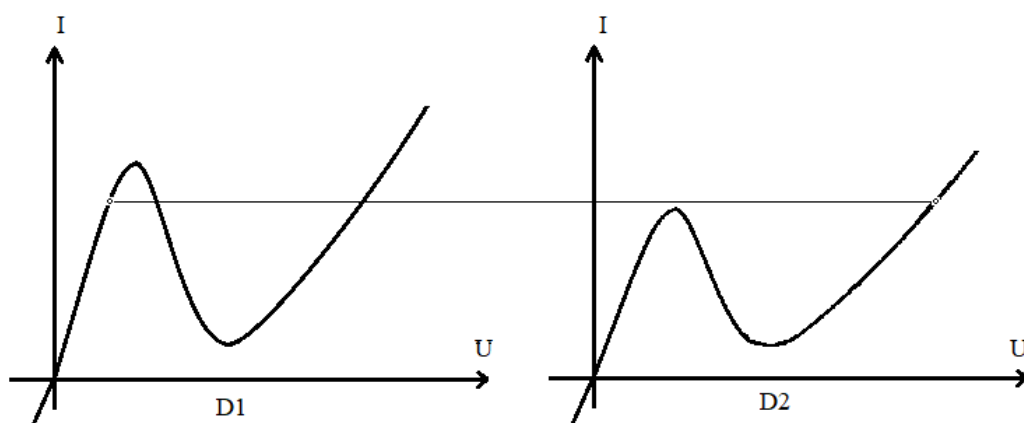


Рис.3.2.12. ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання за більшої напруги, ніж напруга впадини другого D2 тунельного діоду

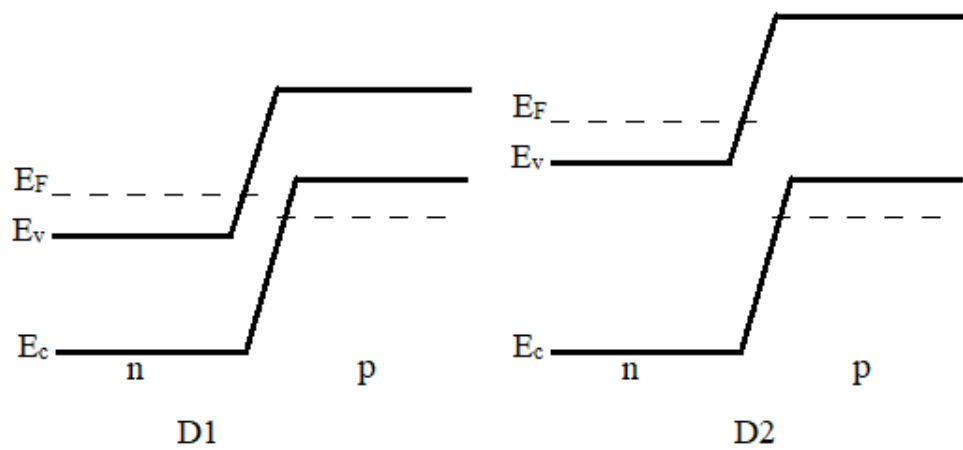


Рис.3.2.13. Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання за більшої напруги, ніж напруга впадини другого D2 тунельного діоду

Значення струму буде зростати до точки E на вольт-амперній характеристиці послідовного співнапрявленого включення тунельних діодів (рис.3.2.3).

Тобто діод D1 вийшов на струм та напругу піку. Зонна діаграма та ВАХ на рис.3.2.14 та рис.3.2.15 повністю описують дану ситуацію.

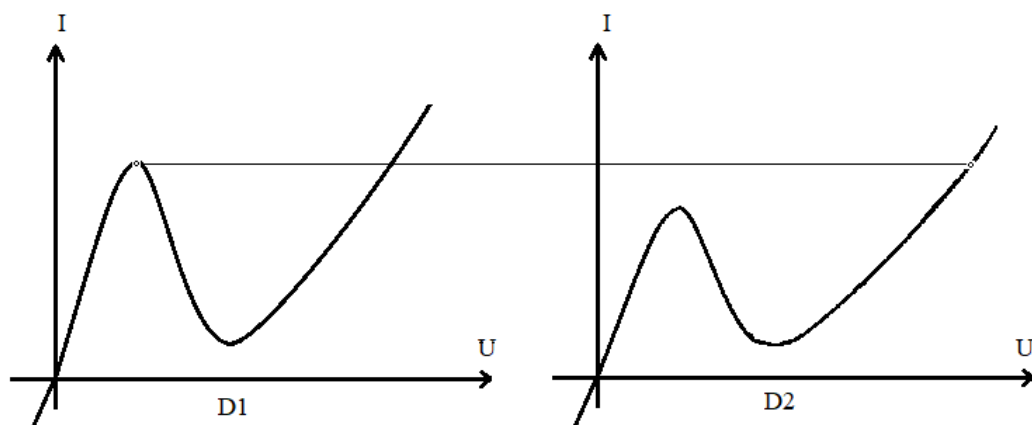


Рис.3.2.14. ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання за напруги піку першого D1 тунельного діоду

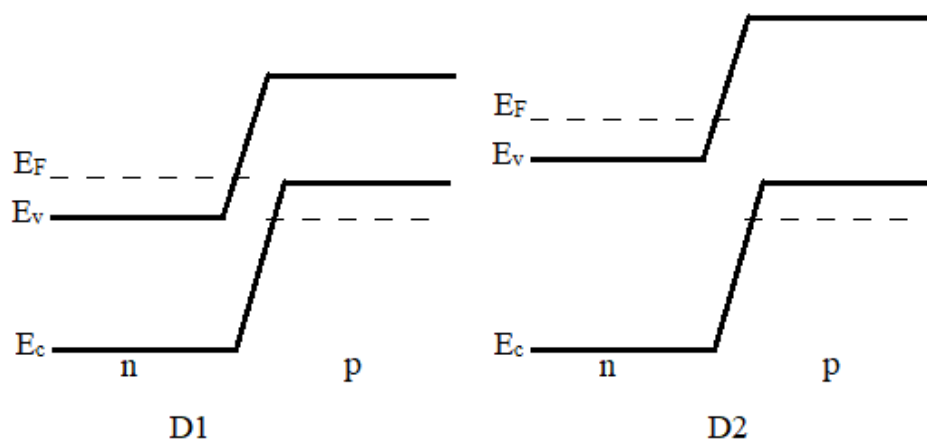


Рис.3.2.15. Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання за напруги піку першого D1 тунельного діоду

При наступному збільшенні значення прямого зміщення вже перший діод D1 перейде в нестабільний стан ВАХ (Рис.3.2.16), що покаже різкий спад загального струму через з'єднання, а напруга в колі буде дорівнювати сумі напруг на першому діоді D1 та на другому діоді D2. Цей стан відповідає точці F на рис.3.2.3.

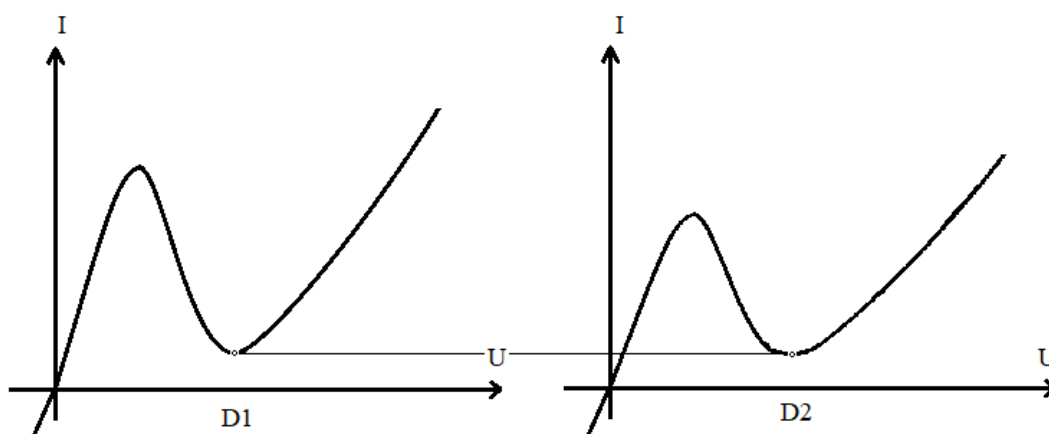


Рис.3.2.16. ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання за напруги впадини першого D1 тунельного діоду

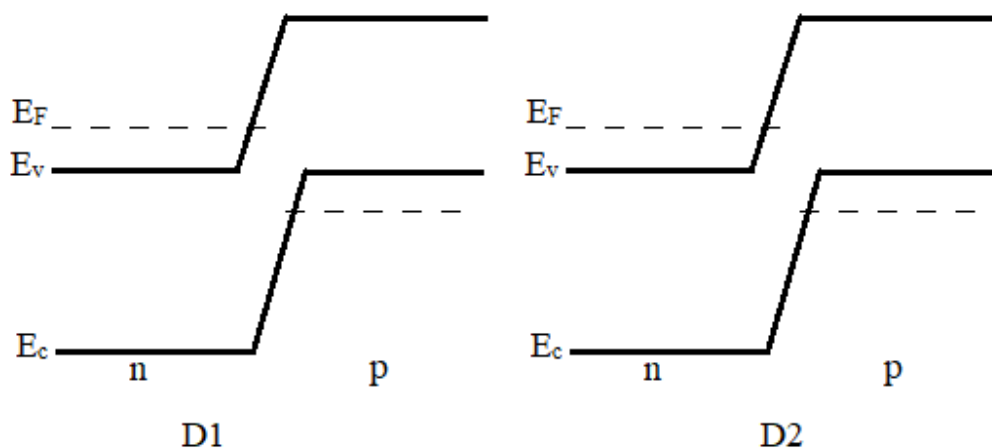


Рис.3.2.17. Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання за напруги впадини першого D1 тунельного діоду

Підвищення загальної напруги вище суми напруг на першому D1 та другому D2 тунельних діодах (точка G на рис.3.2.3) призведе до того, що через все з'єднання почне протікати тільки дифузійна складова струму.

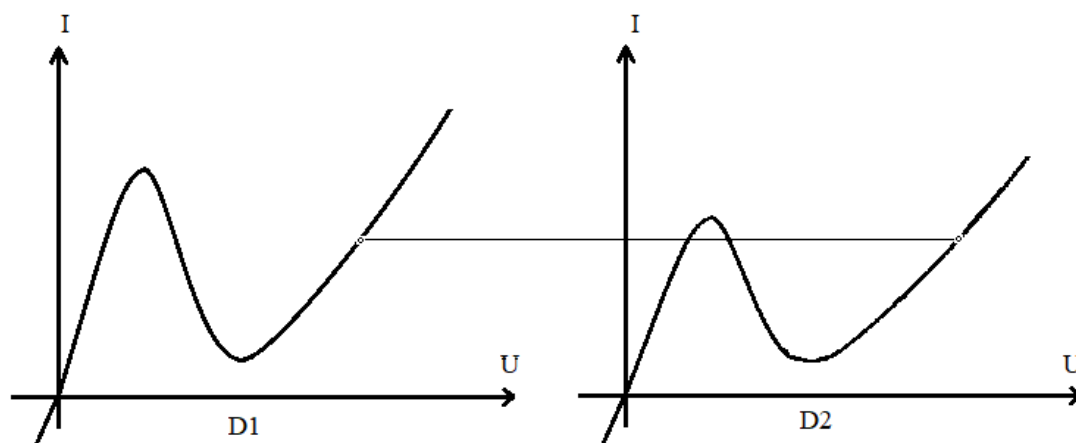


Рис.3.2.18. ВАХ послідовного співнапрявленого з'єднання за напруги при, якій через з'єднання починає протікати дифузійна складова струму

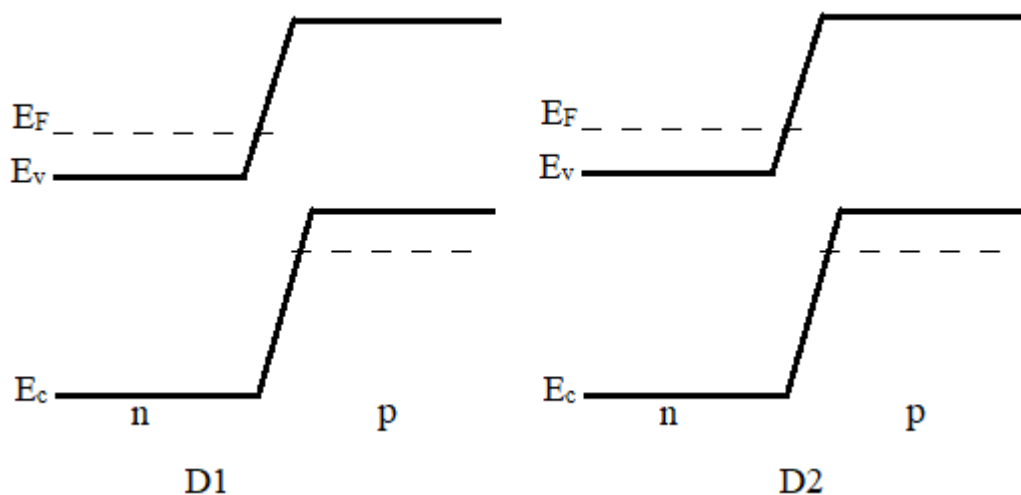


Рис.3.2.19. Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання за напруги при, якій через з'єднання починає протікати дифузійна складова струму

При подаванні зовнішньої напруги (точка Н на рис. 3.2.3) у зворотному напрямі висота потенціального бар'єра р-п переходів тунельних діодів D1 та D2 збільшується і саме тому у сусідніх областях збільшується перекривання енергетичних зон (Рис. 3.2.20). Через діоди буде проходити тунельний струм у зворотному напрямі. У міру підвищення зворотної напруги буде різко збільшуватися значення цього струму, оскільки при цьому ще більша кількість електронів з валентної зони р-області має можливість тунелювати в зону провідності n-області.

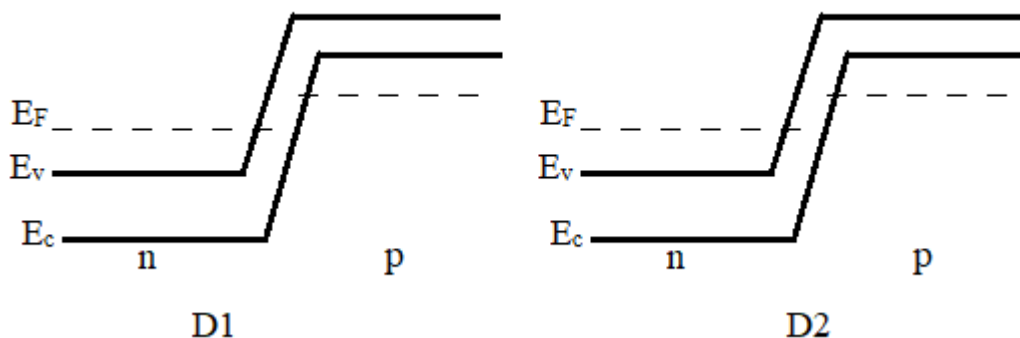


Рис.3.2.20. Енергетична діаграма послідовного співнапрявленого з'єднання за зворотнього зміщення поданого на з'єднання

Отже послідовне включення співнаправлених тунельних діодів з різними вольт-амперними характеристиками призводить до появи проміжків з зворотнім диференційним опором . Причому варто відмітити, що кількість таких проміжків залежить від кількості тунельних діодів ввімкнених послідовно співнаправлено.

ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. В ході виконання роботи були описані послідовне зустрічне включення та послідовне співнаправлене включення тунельних діодів з абсолютно однаковими та різними вольт-амперними характеристиками. Представлено зонні діаграми та ВАХ кожного з'єднання в залежності від зміни зовнішнього зміщення.

2. Послідовне зустрічне з'єднання вирізняється тим, що ВАХ в такому випадку залежить від прямої гілки ВАХ р-n переходів тунельних діодів, які включено в коло. В порівнянні з прямою гілкою ВАХ звичайного тунельного діода, напруги піку та впадини зміщені у бік зростання наруги.

3. Результиуюча вольт-амперна характеристика послідовного співнаправленого з'єднання тунельних діодів з абсолютно ідентичними ВАХ має таке розтягнення по напрузі, тому що тунельні діоди ввімкнені послідовно. Також потрібно зазначити, що результиуюча ВАХ такого з'єднання буде розтягуватися по напрузі в стільки раз, скільки тунельних діодів включено послідовно. Але через те, що виготовити тунельні діоди з абсолютно ідентичними ВАХ майже не можливо, таке з'єднання використовувати досить проблематично.

4. Особливістю послідовного співнаправленого включення тунельних діодів з різними вольт-амперними характеристиками є поява проміжків з зворотнім диференційним опором на результиуючій вольт-амперній характеристиці. Кількість таких проміжків залежить від кількості тунельних діодів ввімкнених послідовно співнаправлено в схему.

5. Проведено експериментальне дослідження в якому представлено виникнення додаткового проміжку з зворотнім диференційним опором на вольт-амперній характеристиці послідовного співнаправленого включення тунельних діодів з різними вольт-амперними характеристиками з'єднання тунельних діодів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ, ПОСИЛАННЯ

1. К.С. Ржевкін "Тунельний діод", Масова радіобібліотека випуск 452, Госенергоіздат, 1962, 23с.
2. Е. В. Янчук «Туннельные диоды в приемно-усилительных устройствах», Масова радіобібліотека випуск 628, Госенергоіздат, 1967, 55с.
3. Горюнов Н., А.Ф. Кузнецов, А.А. Екслер, «Схемы на туннельных диодах» Масова радіобібліотека випуск 586, 1965, 78с..
4. Тациян В.В. «Полупроводниковые переключающие приборы», Масова радіобібліотека випуск 629, 1967, 70с.
5. Фистуль В. И., Шварц Н. З. «Туннельные диоды», УНФ 77, 1962,.109-160с.
6. Панков Сергей Евгеньевич «Изучение туннельного эффекта с помощью полупроводникового туннельного диода», Тульский Государственный университет 2006, 25с.
7. Борисов О.В., Ю.І. Якименко, «Твердотільна електроніка», підручник, Ю.І Якименко, Ред., Київ:НТУУ «КПІ», 2015, 484с.
8. І.М. Бондаренко «Мікроелектроніка НВЧ» ч. 2 (Напівпровідникові елементи та пристрої НВЧ), ХНУРЕ, 2019, 172с.
9. Esaki L. , «Phenomen in narrow germanium paranormal-junctions letter» "Phys. Rev.", 1958, 603с. - DOI:<https://doi.org/10.1103/PhysRev.109.603>
10. Гладкий Б.І. «Напівпровідниковий n-діод (тунельний)», патент № 92219, 2009, H01L 29/88.
11. Sze S.M., Ng K.K., Physics of Semiconductor Devices, Hoboken: John Wiley & Sony, inc, 2007.
12. Litovchenko V., Evtukh A. Vacuum Nanoelectronics. In Handbook of Semiconductor Nanostructures and Nanodevices, V.3. Spintronics and Nanoelectronics. Edited by A.A. Balandin and K.L. Wang, American Scientific Publishers, Los Angeles. 2006, p.153-234.

13. Шевлякова Г.В. Магістерська дисертація «Симетричні кремнієві діодні структури р-п-р та п-р-п типу», наук. кер. Борисов О.В., 2018р.
14. Ясногородський М.А. Магістерська дисертація «Симетричний тунельний діод», наук. кер. Борисов О.В. 2019р.
15. Kwang-J.G., Yan K.S. «Modeling current-voltage and hysteretic current-voltage characteristics with two resonant tunneling diodes connected in series », 1997р.
- PII: S0038-1101(27)001
16. A.S. Abdalla, M.H. Eisa, R. Alhathloulc, O. Aldaghrac «Quantum resonant tunneling in semiconductor double-barrier structure», Beijing Key Lab. of Nanophotonics and Ultrafine Optoelectronic Systems, School of Physics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China, 2018р. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.05.095>
17. Yan Yan «Silicon-based tunnel diode technology», Graduate Program in Electrical Engineering Notre Dame, Indiana, 2008, 119с.
18. W. Abd El-Basit, Z.I.M. Awad, S.A. Kamh, F.A.S. Soliman «Temperature dependence of backward tunnel diode oscillator circuit», Electronic Research Lab., Physics Dept., Faculty of Women for Arts, Science, and Education, Ain-shams University, Cairo, Egypt, 2020, -DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2020.104756>
19. Rania Mohamad Abdallah, Ahmed Ahmed Shaaban Dessouki, Moustafa Hussein Aly «The Resonant Tunneling Diode characterization for high frequency communication systems», Port Said University, Faculty of Engineering, Port Said, Egypt, 2018, -DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mejo.2018.02.003>
20. S. M. Sze, Kwok K. Ng «Physics of Semiconductor Devices», Department of Electronics Engineering National Chiao Tung University Hsinchu, Taiwan, 2007, 815с.